

# **Tiegeometrian vaikutukset ajokäyttäytymiseen**

Tiehallinnon selvityksiä 18/2009

# **Tiegeometrian vaikutukset ajokäyttäytymiseen**

**Tiehallinnon selvityksiä 18/2009**

**Tiehallinto**

Helsinki 2009



Verkkajulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 978-952-221-209-2

TIEH 3201132-v

**TIEHALLINTO**

Keskushallinto

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0204 22 11

**Jukka Pasanen, Jukka Räsänen, Ralf Granlund, Anne Vehmas. Tiegeometrian vaikutukset ajokäyttäytymiseen.** Helsinki 2009. Tiehallinto, Keskushallinto. Tiehallinnon selvityksiä 18/2008, 76 s. + liitt. 7 s. ISSN 1459-1553, ISBN 978-952-221-209-2, TIEH 3201132-v

**Asiasanat:** Geometrinen suunnittelu, linjaus, tasaus, poikkileikkaus, autoilijat, käyttäytyminen, ajonopeus, liikennevirta  
**Aiheluokka:** 31, 84

## TIIVISTELMÄ

Autoa ohjaava kuljettaja sovittaa toimintansa pitkälti tien geometrian mukaan. Leveä tie houkuttelee ajamaan kovaa, mäkisyys ja kaarteisuus vähentävät ohitusmahdollisuuksia ja alentavat ajonopeuksia. Myös muut tiellä liikkujat vaikuttavat kuljettajan toimintaan. Kuljettajan käyttäytymistä pyritään ohjaamaan liikennesäännöillä.

Tässä kirjallisuusselvityksessä tutkittiin miten tiegeometrialla (linjaus, tasaus ja leveys) voidaan vaikuttaa kuljettajien ajonopeuksiin ja muuhun ajokäyttäytymiseen. Tarkasteltavana olivat yksiajorataiset, kaksikaistaiset tiet linjaosuuksilla eri tie-, nopeusrajoitus- ja ympäristöolosuhteissa.

Suuret erot peräkkäisten kaarteiden ominaisuuksissa johtavat tavallista voimakkaampiin hidastamisiin kaarteita lähestyttäessä. Vastaavasti yksittäiset pienisäteiset kaarteet johtavat suurempiin nopeusmuutoksiin kaarteita lähestyttäessä ja kaarteista poistuttaessa. Useimmiten kuljettajat aliarvioivat oman todellisen nopeutensa. Auton sivuttaissijainti ajokaistalla vaihtelee erityisesti alle 200 metrin säteisissä kaarteissa. Linjauksen puutteiden kompensoiminen pelkästään tien leveyttä tai optista ohjausta (esimerkiksi reunapaalut) parantamalla ei suomalaisten kokemusten mukaan välttämättä paranna liikenneturvallisuutta.

Ohitusmahdollisuuksien puute johtaa sujuvuusongelmien lisäksi myös riskinottoon. Tien leventtäminen kasvattaa nopeuksia ja lisää ohituksia. Tällöin onnettomuusriski ei useimpien tutkimusten mukaan kuitenkaan kasva, jos tasaus ja linjaus vastaavat samaa laatutasoa kuin leveys. Kevyen liikenteen turvallisuudelle leveä piennar on hyvä, ja se parantaa myös autoliikenteen turvallisuutta varsinkin kaarteissa. Leveäkaistainen tie lisää ohituksia, mutta tavallista tietä suurempi osa ohituksista kyetään tekemään haittaamatta vastaantulevia ajoneuvoja.

Tiegeometrian vaikutusta ajokäyttäytymiseen on tutkittu viime vuosina melko vähän. Tiensuunnittelun keinojen tutkimus on jäänyt sekä Euroopassa että USA:ssa liikennetelematiikan tutkimuksen jalkoihin. Tietopuutteet ja jatkotutkimustarpeet liittyvät erityisesti sää-, keli ja valaistusolosuhteisiin, eri geometriaelementtien yhteisvaikutuksiin, eri ajoneuvo- ja liikkujaryhmien huomiointiin ottamiseen (raskas ja kevyt liikenne) ja esimerkiksi ajoneuvojen sivuttaissijaintiin ja sen merkityksen ymmärtämiseen. Vakionopeussäätimet ja muu automatiikka yleistyvät koko ajan, ja niiden vaikutuksista ajokäyttäytymiseen ja edelleen mm. liikenneturvallisuuteen tarvittaisiin uutta tietoa. Ohituksiin vaikuttavista tekijöistä ja ohituskäyttäytymiseroista maan eri osien välillä tulisi saada lisää tietoa, ja kuljettajan visuaalisen kuormittumisen ja kokonaiskuormittumisen mittaamista sekä analysointia kannattaisi kehittää ja tiegeometrian vaikutusta kuormittumiseen tutkia lisää.

**Jukka Pasanen, Jukka Räsänen, Ralf Granlund, Anne Vehmas. Väggeometrins inverkan på körbeteende.** Helsingfors 2009. Vägförvaltningen, Centraförvaltningen. Vägförvaltningens utredningar 18/2009, 76 s. + bilagor 7 s. ISSN 1459-1553, ISBN 978-952-221-209-2, TIEH 3201132-v

**Ämnesord:** Geometrisk projektering, linjeföring, profillinje, fordonsförare, körbeteende, körhastighet, tvärsektion, trafikflöde

**Ämnesklass:** 31, 84

## SAMMANFATTNING

Fordonsförare anpassar i betydande grad sina funktioner till de premisser som vägens geometri ger. En bred väg lockar till höga hastigheter, backar och kurvor minskar omkörningsmöjligheterna och sänker körhastigheterna. Även andra som rör sig på vägen inverkar på fordonsförarens funktioner. Trafikreglerna avser att påverka dessa funktioner.

I denna litteraturstudie undersöktes hur man med hjälp av väggeometri (linjeföring, profillinje och bredd) kan inverka på körhastigheter och annat körbeteende på tvåfältiga vägar med en körbana på linjeavsnitt och vid varierande väg-, hastighetsbegränsnings- och vägmiljöförhållanden.

Stora skillnader vad beträffar kurvors egenskaper resulterar i större hastighetsminskning när fordonsföraren närmar sig kurvorna, kurvor med små radier resulterar i större hastighetsändringar när fordonsföraren närmar sig och avlägsnar sig från kurvorna. Fordonsförarna underskattar oftast sin verkliga hastighet. Fordonens sidoläge i körfältet varierar speciellt vid kurvradier under 200 m. En kompensering av linjeföringens brister enbart med att bredda vägen eller förbättra den optiska ledningen (t.ex. med kantpålar) förbättrar enligt finska erfarenheter nödvändigtvis inte trafiksäkerheten.

Brist på omkörningssikt resulterar förutom framkomlighetsproblem i risktagning. En breddning av vägen ökar hastigheter och antalet omkörningar. Olycksrisken växer enligt de flesta underökningarna inte, om profillinje och linjeföring har samma kvalitetsnivå som bredden. En bred vägren är förmålig för lätta trafikens säkerhet och den förbättrar även fordonstrafikens säkerhet speciellt i kurvor. En bred körfil ökar antalet omkörningar, men en större del av omkörningar kan överföras utan att besvära mötande trafik.

Väggeometrins inverkan på körbeteendet har undersökts tämligen litet. Undersökningen av vägprojekteringsmetoder har både i Europa och USA kommit i skymundan av trafiktelematiken. Kunskapsbrister och behov av fortsatta undersökningar hänför sig speciellt till väder-, väglags- och belysningsförhållanden, samverkan mellan olika geometriska element, beaktande av olika fordons- och väganvändargrupper (tung och lätt trafik) och t.ex. fordonens sidoläge och förståelsen för vad det betyder. Autopiloter (konstant hastighet) och annan automatik blir alltmer allmänna och nya rön skulle behövas om deras inverkan på körbeteende och vidare på bl.a. trafiksäkerheten. Mera information skulle behövas om faktorer som inverkar på omkörningar och skillnader i omkörningsbeteendet i olika delar av landet. Det vore värt att mäta och utveckla en analys av fordonsförarens visuella belastning och totala belastning samt vidare undersöka väggeometrins inverkan på belastningen.



Jukka Pasanen, Jukka Räsänen, Ralf Granlund, Anne Vehmas. **Tiegeometrian vaikutukset ajokäyttäytymiseen** (Impacts of road geometry on driving behaviour). Helsinki 2008. Finnish Road Administration. Finnra Reports 18/2009, 76 p. + app. 7 p. ISSN 1459-1553, ISBN 978-952-221-209-2, TIEH 3201132-v

**Keywords:** Geometric design, alignment, profile, drivers, behaviour, driving speed, cross-section, traffic flow

## SUMMARY

Car driver fits his behavior to the limits set by road geometry. A wide road tempts to drive fast, hills and bends reduce speed and overtaking possibilities. Other road users affect driving behavior, as well as regulations and legislation.

The aim of this study was to find out, based on recent literature, how geometric design (horizontal and vertical design and width) of road can affect speed and other driving behavior. Our research concentrated on one-carriageway, two-lane rural roads outside junction areas. Possibilities to affect road users were studied in different types of roads, surroundings, and other circumstances.

If consecutive curves differ a lot from each other, it leads to more intense decelerations when approaching the curves. Small radii lead to harsh accelerations and decelerations. Many drivers underestimate their driving speed. The lateral position of cars varies a lot when the radius of a curve is less than 200 m. Trying to compensate poor geometry only by widening a road or by giving more optical guidance (like side poles) does not seem to improve road safety, based on Finnish experience.

Missing overtaking possibilities led not only to poor traffic fluency but also to risk taking driving behavior. Widening a road tends to increase both speeds and number of overtakings, but this does not increase accident risk if alignment and profile are of the same quality as the width. Wide shoulder is good for pedestrian and bicycle safety, and also for car safety especially at curves. Wide lane increases the number of overtakings, but a bigger proportion of them can be performed without disturbing oncoming cars.

The impact of geometric design on driving behavior has not been studied intensively over the last 10 years. Much more emphasis has been put on telematics both in Europe and in the USA. The gaps revealed in this study concern weather and lighting, combined influence of different design elements, taking into account different vehicle classes or road user groups, and understanding the impacts of lateral position of vehicles. Cruise control and other similar equipment are common nowadays, but their impact on driving behavior, and further on road safety, is not deeply studied. Factors affecting overtaking behavior, or differences in overtaking manners between different regions could be better understood. Measuring and analyzing visual and cognitive load of driver needs still more research also from the point of view of geometric design of road.

## ESIPUHE

Tiegeometria (linjaus, tasaus ja poikkileikkaus) on tiensuunnittelijan peruskeino sovitettaessa väylä liikennekysynnän ja maaston asettamiin reunaehdoin. Samalla on otettava huomioon ratkaisujen vaikutus kuljettajien toimintaan. Onnistunut tiegeometria ohjaa kuljettajaa toimimaan suunnitellulla tavalla ja parantaa siten ajamisen turvallisuutta ja mukavuutta sekä liikenteen sujuvuutta. Asiaa tutkittiin paljon 1980-luvulle asti ja nykyiset suunnitteluohjeet perustuvat pitkälti silloiseen tietämykseen. Tässä selvityksessä on koottu tuorein aiheeseen liittyvä tieto sekä ohjetöiden taustaksi että tutkimustarpeiden selvittämiseksi.

Selvityksen laatimista ovat ohjanneet Jorma Saarelainen ja Mikko Räsänen Tiehallinnon asiantuntijapalveluista. Taustaselvitys on tehty Ramboll Finland Oy:ssä, jossa työhön ovat osallistuneet tekn. yo Jukka Pasanen, DI Jukka Räsänen, DI Ralf Granlund ja psyk. maist. Anne Vehmas. Raportin sisältö-tarkastuksen on tehnyt DI Ari Sirkiä.

Helsinki joulukuu 2009

Tiehallinto  
Asiantuntijapalvelut

**Sisältö**

1	JOHDANTO	11
2	TEHTÄVÄ JA TAVOITTEET	12
3	TIEGEOMETRIAN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT	13
3.1	Suuntauksen suunnittelu	13
3.1.1	Tielinjan suunnittelu	14
3.1.2	Tasausviivan suunnittelu	15
3.2	Tien kolmiulotteinen suunnittelu	16
3.3	Poikkileikkauksen suunnittelu	17
4	KULJETTAJAN AJOKÄYTTÄYTYMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	18
4.1	Kuljettajan tiedontarve	18
4.2	Nopeuden hahmottaminen ja valinta	20
4.3	Kuljettajan kuormittuminen (Driver Workload)	20
4.4	Linjauksen johdonmukaisuus	22
5	TIEGEOMETRIAN VAIKUTUS AJOKÄYTTÄYTYMISEEN	24
5.1	Linjaus	24
5.1.1	Vaikutus ajonopeuden valintaan	24
5.1.2	Vaikutus ajolinjaan	28
5.1.3	Vaikutus jarrutus- ja kiihdytyskäyttäytymiseen	34
5.1.4	Vaikutus kuljettajan kuormittumiseen	47
5.1.5	Vaikutukset onnettomuuksiin	48
5.2	Tasaus	51
5.3	Poikkileikkaus	52
5.3.1	Vaikutukset liikenneturvallisuuteen	52
5.3.2	Vaikutukset nopeuksiin ja ajolinjaan	55
5.3.3	Vaikutukset ohituksiin	56
5.4	Yhteisvaikutukset	57
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	60
7	LÄHTEET	64
8	MUUTA KIRJALLISUUTTA	68
9	LIITTEET	76



## 1 JOHDANTO

Auton kuljettaja sovittaa toimintansa pitkälti tien geometrian antamien reunaehtojen mukaisesti. Leveä tie houkuttelee ajamaan kovaa, mäkyisyys ja kaarteisuus vähentävät ohitusmahdollisuuksia sekä alentavat ajonopeuksia. Muut tiellä liikkujat vaikuttavat kuljettajan toimintaan, ja liikennesäännöillä pyritään ohjaamaan sitä. Liikkumisen ja kuljettamisen on oltava turvallista, edullista ja sujuvaa, eivätkä haitalliset ympäristövaikutukset saa olla kohtuuttomia. Yksittäisen tiejakson jokaisen elementin on sovittava tähän tavoitekehikkoon.

Laajennetussa kuljettajakäyttäytymisen hierarkkisessa mallissa kuljettajan toimintaa tarkastellaan viidellä tasolla. Neljä ensimmäistä tasoa alhaalta lukien ovat ajoneuvon hallinta, liikennetilanteiden hallinta, matkan tavoitteet, matkaseura ja ajoympäristö sekä kuljettajan elämisen tavoitteet ja elämisen taidot. Viidenneksi tasoksi on myöhemmin lisätty yhteiskunta, kulttuurin ja alakulttuurin taso. (Keskinen 2008) Tämä tutkimus keskittyy kahteen alimpaan tasoon. Ajajien operationaaliseen käyttäytymiseen (ajonopeudet, ajoneuvojen ajoetäisyydet (aikavälit), auton sijainti tien leveyssuunnassa, ohitukset jne.) pyritään vaikuttamaan tiegeometrialla niin, että sujuvuus- ja turvallisuustavoitteet saavutetaan. Ajonopeudet ja niiden hajonta ovat erityisen tärkeitä sujuvuuden ja liikenneturvallisuuden indikaattoreita. Siksi ajonopeudet pyritään pitämään kuhunkin tilanteeseen sopivalla tasolla ja ajoneuvojen nopeuserot pieninä.

Tien suunnittelu on periaatteessa väylän mitoittamista suunnittelunopeuden ja liikenteen mitoitusvuoden arvioidun määrän sekä koostumuksen mukaan ja sovittamista ympäristöön edellä mainitut tavoitteet ja reunaehdot huomioiden ottaen. Vastaavasti tien suunnittelulla voidaan vaikuttaa uudella tiellä käytettäviin nopeuksiin ja sen houkutteleman liikenteen määrään. Tielinjalla liittyvien ulkopuolella vaikutuskeinoina ovat nopeusrajoituksen ohella tien taseus, linjaus ja poikkileikkaus. Tehtävää ei saa käsittää vain niin, että varmistetaan eri elementtien vastaavan vähintään suunnitteluohjeiden minimitasoa. Suunnittelija voi siis vaikuttaa ajokäyttäytymiseen tiegeometrian avulla.

## 2 TEHTÄVÄ JA TAVOITTEET

Tämän työn tavoitteena oli selvittää millä tavoin tien suuntaus (linjaus, tasa-us) ja poikkileikkaus vaikuttavat kuljettajien operatiiviseen ajokäyttäytymiseen yksiajorataisilla kaksikaistaisilla teillä. Tarkemmin työn tavoitteiksi asetettiin selvittää:

- miten tiegeometrialla voidaan vaikuttaa ajonopeuksiin ja muuhun ajokäyttäytymiseen eri tie-, nopeusrajoitus- ja ympäristöolosuhteissa
- millaisilla suuntaus- ja poikkileikkausratkaisuilla ajokäyttäytymiseen voidaan vaikuttaa ja mihin vaikutukset perustuvat
- millaiset vaaka- ja pystygeometriset ratkaisut soveltuvat eri tilanteisiin
- millaiset tien vaaka- ja pystygeometriset elementtiyhdistelmät ovat osoittautuneet tehokkaiksi keinoiksi vaikuttaa ajokäyttäytymiseen

Tavoitteena oli siis selvittää kuinka paljon tiesuunnittelun avulla voidaan vaikuttaa itse ajamiseen ja kuljettajien toimintaan teillä, ja sitä kautta löytää turvallisempia ratkaisuja linjaukselle, tasaukselle ja poikkileikkaukselle eri nopeusrajoitusalueilla. Tieto palvelee liikenneteknisten suunnitteluohjeiden kehittämistä.

Työ tehtiin kirjallisuusselvityksenä kotimaisista ja ulkomaisista tiegeometrian vaikutuksia ajokäyttäytymiseen tarkastelevista tutkimuksista, selvityksistä ja niiden tuloksista. Hakuja tehtiin varsinkin tieteellisiin tietokantoihin, mutta myös yleisiä hakukoneita käytettiin. Hakutermeinä olivat linjaukseen, tasaukseen, kaarteisuuteen, mäkisyyteen, poikkileikkaukseen, ohituksiin, nopeuksiin ja turvallisuuteen liittyvät sanat suomen-, ruotsin-, englannin- ja saksankielisinä.

### 3 TIEGEOMETRIAN SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT

#### 3.1 Suuntauksen suunnittelu

Suuntauksen suunnittelun perusvaatimus on pysähtymismatka, joka tarkoittaa matkaa, jonka kuljettaja tarvitsee ajoneuvonsa pysäyttämiseen (Hartikainen ja Kuronen 1999). Pysähtymismatka lasketaan kaavasta:

$$L = t_r \times v + \frac{1}{2} \times \frac{v^2}{g(f \pm s)} = t_r \times \frac{v}{3,6} + \frac{v^2}{254(f \pm s)} \quad (1)$$

$L$	= pysähtymismatka (m)
$t_r$	= reaktioaika (s)
$v$	= nopeus ennen jarrutusta (m/s)
$V$	= nopeus ennen jarrutusta (km/h)
$f$	= kitkakerroin
$s$	= pituuskaltevuus
$g$	= putoamiskiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ ).

Kaavasta (1) nähdään alla mainitut suuntauksen suunnittelun keskeiset mitoitusperusteet, joista suurin vaikutus pysähtymismatkaan on mitoitusnopeudella:

- mitoitusnopeus
- kuljettajan reaktioaika
- tien kitkaominaisuudet.

Kaksikaistaisen tien suunnittelun lähtökohtana ovat kuitenkin mahdollisimman hyvät näkemät, jolloin suurimmalla osalla tietä tulee olla pysähtymismatkaa pidempi näkemä. Pidemmät näkemät tarjoavat esimerkiksi mahdollisuuden ohittamiseen. Käytännön suunnittelussa vaikuttavat myös mm. tien liikenteellinen merkitys, toiminnallinen luokka, paikalliset olosuhteet, suunnittelu- ja mitoitusnopeus, mitoitusliikenne ja tietyyppi.

Näkemä tarkoittaa näkemäesteistä vapaata matkaa, jonka ajoneuvon kuljettaja näkee tien suunnassa (Hartikainen ja Kuronen 1999). Näkemäalueiden määrittämisperusteina ovat

- pysähtymisnäkemä
- kohtaamisnäkemä
- ohitusnäkemä
- liittymisnäkemä
- päätöksentekonäkemä.

Kaksikaistaisella tiellä on oltava vähintään pysähtymisnäkemä tien joka kohdassa (Tiehallinnon ohje 2002). Hyvin kapeilla yksikaistaisilla, molempiin suuntiin liikennöitävillä teillä sekä leveäkaistaisilla teillä minimivaatimuksena on kohtaamisnäkemä.

Suuntauksen suunnittelusta on kerrottu tarkemmin esimerkiksi Tiehallinnon julkaisussa "Parannettavien pääteiden suuntaus" (1999).



### 3.1.1 Tielinjan suunnittelu

Tielinjalla (vaakageometria) tarkoitetaan suorista ja kaarteista muodostettua linjaa, joka määrää tien sijaintipaikan suunnitelmakartalla ja maastossa (Hartikainen ja Kuronen 1999). Tielinjan suunnittelussa on yleensä käytössä kolme elementtiä: suora, ympyränkaari ja siirtymäkaari. Geometriselta muodoeltaan erilaiset elementit vaikuttavat jokainen eri tavalla ajodynamiikkaan ja näkemäolosuhteisiin.

Suora tielinja on näkemäolosuhteiden ja ajodynamiikan kannalta helppo elementti varsinkin tasaisessa maastossa, koska se ei aiheuta näkemäestettä tien suunnassa eikä ajodynamiikka käytännössä aiheuta nopeudenvälinnälle rajoituksia. Suora tielinja voi kuitenkin houkutella ylinopeuksiin ja aiheuttaa kuljettajille vaikeuksia arvioida vastaantulevien ajoneuvojen nopeutta ja etäisyyttä ohitustilanteissa. Lisäksi suora tielinja voidaan kokea puuduttavana ja yksitoikkoisena, mikä voi johtaa huomion herpaantumiseen. Pimeällä ajettaessa vastaantulevien autojen ajovalot häikäisevät kuljettajaa ja häiritsevät näin ajosuoritusta.

Kaare on tiegeometrian suunnittelun pääelementti. Kaarteita ovat ympyränkaari ja siirtymäkaari. Kaarteissa ajaminen aiheuttaa kuitenkin ajodynamiikan ja näkemäolosuhteiden kautta rajoituksia kaarteiden muodolle. Kaarteissa kulkevaan ajoneuvoon kohdistuu keskeiskiihtyvyys, jonka aiheuttama voima täytyy korvata kaarteiden sivukaltevuudella sekä renkaiden ja tienpinnan välisellä kitkalla, jotta ajoneuvo pysyisi ajoradalla.

Ympyränkaarta kuvaavana parametrina käytetään sen sädettä, jonka ajodynamiikkaan perustuvat minimiärvot (taulukko 1) voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$R = \frac{v^2}{g(q+f)} = \frac{V^2}{127(q+f)} \quad (2)$$

$R$	= ympyräkaaren säde (m)
$v$	= mitoitusnopeus (m/s)
$V$	= mitoitusnopeus (km/h)
$q$	= sivukaltevuus
$f$	= kitkakerroin
$g$	= putoamiskiihtyvyys ( $m/s^2$ )

Suomessa ympyränkaaren säteen ohjearvojen määrittämisessä on pyritty siihen, että sivuttaiskiihtyvyyden ja sivukitkan arvo olisi ajomukavuuden kannalta sopiva ja tielinja ajodynamiikaltaan mahdollisimman tasalaatuinen.

*Taulukko 1. Ympyränkaaren säteen vähimmäisarvot sekä niitä vastaavat sivukitkat ja -kaltevuudet sekä ohjearvot eri mitoitusnopeuksille.*

Mitoitusnopeus (km/h)	Sivukitkakerroin	Sivukaltevuus (%)	Kaarresäteen vähimmäisarvo (m)	Kaarresäteen ohjearvot (m)
50	0,130	7,0	110	150 - 300
60	0,115	6,0	170	250 - 500
70	0,100	6,0	250	350 - 700
80	0,090	6,0	350	500 - 1000
90	0,080	5,0	500	750 - 1000
100	0,070	5,0	650	1000 - 2000

Siirtymäkaari mahdollistaa tasaisen siirtymisen suoran ja ympyränkaaren tai kahden ympyränkaaren välillä. Siirtymäkaarille on havaittu olevan olemassa tiettyjä vaatimuksia (esimerkiksi säännönmukaisesti pituuden mukana liisääntyvä kaarevuus), jotta ne sopivat tiesuunnitteluun. Parhaiten vaatimukset täyttää klotoidi ( $RL = A^2$ , jossa L on siirtymäkaaren pituus ja A parametri), joka onkin yleisimmin käytössä oleva siirtymäkaari. Koska siirtymäkaarta käytetään elementtien yhdistämisen lisäksi sivukaltevuuksien muuttamiseen, asettaa se siirtymäkaarelle vähimmäispituusvaatimuksen. Myös optiset näkökohdat asettavat rajoituksensa klotoidin parametrin arvoille. Käytännössä ajodynamiikan ja optiset näkökohdat huomioon ottava muistisääntö klotoidin parametrille A on, että se on kaarresäteen kolmanneksen ja kaarresäteen välillä eli  $R/3 \leq A \leq R$ .

### 3.1.2 Tasausviivan suunnittelu

Tasausviivalla tarkoitetaan tienpinnan korkeusvaihtelua tien pituussuunnassa osoittavaa kuvaajaa (Hartikainen ja Kuronen 1999). Tasausviivan suunnittelussa on tielinjan suunnittelusta poiketen käytössä vain kaksi elementtiä, jotka ovat suora ja pyörästyskaari, jona käytetään ympyränkaarta. Siirtymäkaarta ei tarvita, koska pituuskaltevuudet ja niiden muutokset ovat pieniä.

Taulukossa 2 on esitetty pyörästyskaaren säteen vähimmäis- ja ohjearvot tieosalla, jolla ei ole liittymiä. Kuperassa taitteessa taulukon vähimmäisarvot perustuvat mitoitus pysähtymisnäkemän takaamiseen 0,1 metriä korkeaan esteeseen ajettaessa mitoitusnopeudella. Taulukon arvoja laskettaessa on oletettu kaaren olevan vähintään mitoitus pysähtymisnäkemän pituinen. Koverassa taitteessa näkemäolosuhteet ovat yleensä hyvät valoisaan aikaan ja valaistuilla tieosuuksilla. Pimeällä valaisemattomalla tiellä kovera kaari kuitenkin rajoittaa näkemää, koska valoheittäjien valaisema tienosa tulee sitä lyhyemmäksi mitä pienempi pyörästyskaaren säde on. (Tiehallinto 1975)



Taulukko 2. Pyöristyskaaren säteen vähimmäis- ja ohjearvot tieosalla, jolla ei ole liittymiä.

Mitoitus- nopeus (km/h)	Pyöristyskaaren säde (m)		
	Vähimmäisarvot		Ohjearvot kuperassa taitteessa
	Kupera	Kovera	
50	800	1000	800 - 1400
60	1500	1500	1500 - 2500
70	2400	2100	2400 - 4100
80	3900	2800	3900 - 6500
90	6000	3500	6000 - 10000
100	9000	4300	9000 - 15000

### 3.2 Tien kolmiulotteinen suunnittelu

Geometrisessa mielessä tie on kolmiulotteinen avaruuspinta, joka määräytyy kolmen päämitoitustekijän (tielinjan, tasausviivan ja poikkileikkauksen) perusteella ja kukin päämitoitustekijä muodostuu useista elementeistä (Hartikainen ja Kuronen 1999).

Tien geometrisen muodon suunnittelussa kiinnitetään huomiota lähinnä kolmeen näkökohtaan, jotka ovat

- näkemäolosuhteiden muodostuminen
- optinen ohjaus ja joustavuus
- tien ja maaston sopusointu.

Tielinjan ja tasausviivan yhteensovittamisessa on tärkeää, että edelliset kolme kohtaa otetaan huomioon yhtä aikaa. Vääränlaisilla tielinjan ja tasausviivan yhdistelmillä voidaan saada aikaan autoilijoita harhaanjohtavia ja heille vaarallisia ratkaisuja. Oikeanlaiset yhdistelmät taas voivat auttaa kuljettajaa ennakoimaan tulevaa ja näin sovittamaan nopeutensa ja ohjaustoiminnot sen mukaisiksi. Optisen ohjauksen ja toimivan kolmiulotteisen geometrian suhteen selkeät ja toimivat ohjeet voidaan tiivistää Tielaitoksen 1999 julkaisemasta raportista Parannettavien pääteiden suuntaus. Asia on käsitelty tarkemmin yleisperiaatteiden osalta Tiehallinnon ohjeessa Tien suuntauksen suunnittelu (Tiehallinto 1975).

Ajoneuvon kuljettajan on voitava joko tien geometrisen muodon, tiemerkin-  
töjen tai tieympäristön perusteella ennakoida tien kaarevuuden suunnassa ja suuruudessa tapahtuvia muutoksia. Optinen joustavuus saavutetaan ottamalla suuntauksen suunnittelussa huomioon tien perspektiivinen lyheneminen.

Tielinja on pyrittävä suunnittelemaan tasausviivan kuperan pyöristykseen kohdalla kaarevaksi ja siten, ettei kaarevuuden suunta muutu. Tien reuna antaa tällöin optisen ohjauksen, jota voidaan tehostaa ulkokaarteiden puolella esimerkiksi istutuksilla. Tien optisen joustavuuden saavuttamiseksi tulisi noudattaa seuraavia periaatteita:

- tielinjan ja tasausviivan kaarien tulisi olla ohjearvojen ja suositusten mukaisesti riittävän loivia ja pitkiä (taulukot 1 ja 2)



- kohdakkain sijaitsevien kaarre- ja pyöristyssäteiden tulisi täyttää seuraava ehto, jotta tien reunaan ei muodostuisi näennäisesti liikkuvaa käännepestettä, vaan ajoradan molemmat reunat näyttäisivät samaan suuntaan kaarevilta (taulukko 3).

$$S/R \geq B - 1.5, \text{ jossa } \begin{aligned} S &= \text{pyöristyskaaren säde (m)} \\ R &= \text{tielinjan kaarresäde (m) ja} \\ B &= \text{ajoradan leveys (m)} \end{aligned}$$

- Tielinjan ja tasausviivan kaarien alkupisteiden ja käännepestien tulisi yleensä sijaita kohdakkain ja tielinjan kaarresäteiden olla suuria. Tielinjan erikoispiste voi tien optisen joustavuuden kärsimättä sijaita myös tasausviivan pitkän koveran pyöristyskaaren keskivaiheilla tai tasausviivan suoralla osalla kaukana tasausviivan erikoispisteestä.
- Näkökentässä ei saisi olla samanaikaisesti enempää kuin kaksi tielinjan ja tasauksen kaarta.

Taulukko 3. Pyöristyskaaren säteen ja tielinjan kaarresäteen suhteen vähimmäisarvot (Tielaitos 1999).

Tietyyppi	Ajoradan leveys (m)	Säteiden suhde (S/R)
Tavallinen kaksikaistainen päätie	7.0/7.5	5.5/6.0
Moottoriliikennetie	7.5	6.0
Ohituskaistatie	10.5	9.0
Keskikaiteellinen ohituskaistatie	12.2/13.3	10.7/11.8
Leveäkaistainen tie	10.5/11.0	9.0/9.5
Kapea nelikaistainen tie	15.7/16.8	14.2/15.3
Moottoritie (erilliset ajoradat)	7.5	6.0

Näkemäolosuhteita arvioitaessa on myös muistettava, että yksiajorataisilla teillä ohitukset mahdollistavia osuuksia on oltava riittävästi.

### 3.3 Poikkileikkauksen suunnittelu

Tien poikkileikkaus valitaan tarpeen mukaan. Poikkileikkauksen (leveyden) valintaan vaikuttavat ensi sijassa mitoitusnopeus ja liikennemäärä. Yksiajorataisilla, kaksikaistaisilla teillä kaistan leveydenä käytetään yleensä 3,5 tai 3,75 metriä. Vähäliikenteisillä teillä ja alhaisilla nopeuksilla voi kaistan leveys olla kapeampi. Tyypillisen korkealuokkaisen vilkkaasti liikennöidyn tien leveys (ajorata ja pientareet) on vähintään 10,5 metriä.

Tien on kuivatuksen takia oltava myös sivuttaiskalteva. Sivukaltevuus on suoralla ja loivissa kaarteissa kaksipuoleinen ja 3 %. Jyrkemmissä kaarteissa koko ajorata kallistetaan sisäkaarteeseen päin, ja kaltevuus voi olla jopa 5–6 %.

Poikkileikkaukseen voidaan katsoa liittyvän myös visuaalinen vapaa leveys, eli tien ulkopuolella olevien esteiden välinen etäisyys. Esimerkiksi taajamissa voidaan erilaisilla porttiaiheilla tietoisesti pyrkiä alentamaan liikennevirran nopeutta. Tämä raportti keskittyy kuitenkin tien ominaisuuksiin.

## 4 KULJETTAJAN AJOKÄYTTÄYTYMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kuljettajan ajokäyttäytymiseen vaikuttavat monenlaiset kuljettajaan itseensä, liikenneympäristöön, lainsäädäntöön, keliin, toisiin tienkäyttäjiin ja matkaan liittyvät tekijät. Tässä keskitytään lähinnä tiegeometriaan (linjaus, tasaus, poikkileikkaus) ja kuljettajan ajokäyttäytymiseen.

Tämän luvun asioita on aiemmin käsitelty osittain Tiehallinnon julkaisussa "Kuljettajiin vaikuttaminen liikenneympäristön suunnittelulla". Lukujen 4.1 ja 4.2 asiat on referoitu lyhyesti kyseisestä julkaisusta siinä määrin kuin ne tämän selvityksen osalta ovat olennaisia.

Ajokäyttäytymistä tarkastellaan tässä lähinnä kuljettajan operationaalisena toimintana eli käyttäytymistä mitataan ajoneuvon nopeudella ja siihen liittyvillä toiminnoilla (jarrutus ja kiihdytys) sekä ajoneuvon sivuttaissijainnilla tielinjalla. Tiegeometria vaikuttaa myös ohituskäyttäytymiseen, kohtaamiskäyttäytymiseen ja ajoneuvoetäisyyksiin eri tilanteissa.

### 4.1 Kuljettajan tiedontarve

Kuljettajan ajotoiminta voidaan jakaa moniin osiin eli tehtäviin, jotka sisältävät kolme toisiaan seuraavaa ja toisistaan riippuvaa vaihetta: havainnon, ratkaisun ja suoritukset (Häkkinen ja Luoma 1990). Auton ajaminen on suurelta osin itseohjautuvaa toimintaa (Näätänen ja Summala 1974). Kuljettaja valitsee itse, turvallisuusmarginaaleja muokkaamalla, ajotehtävän vaikeusasteen. Siksi liikenneympäristön tulisi aina tarjota kuljettajalle riittävästi oikeanlaista informaatiota havainnoitavaksi siitä, millainen tie on kyseessä ja miten sillä on tarkoitettu ajettavan. Summala (2001) nimittää tällaisia keinoja opastavaksi ja pakottavaksi designiksi. Näin kuljettaja voisi tehdä havaintojensa pohjalta oikeanlaisia ratkaisuja ja suoriutua ajoneuvonsa ohjaamisesta mahdollisimman turvallisesti.

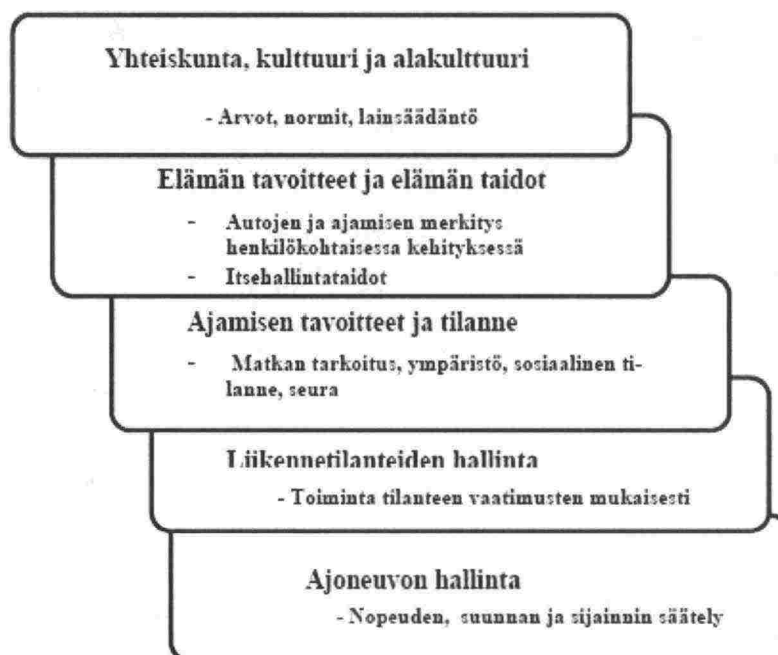
Autolla ajamisen voidaan sanoa myös koostuvan kolmesta osatehtävästä, jotka muodostavat kolme hierarkiatasoa (King ja Lunenfeld 1971, Allen ym. 1971). Näitä kutsutaan strategiseksi, taktiseksi ja operationaaliseksi tasoksi (Michon 1985, van der Molen ja Bötticher 1988).

Strategisen tason tehtävät liittyvät matkan suunnitteluun ja valmisteluun sekä matkan aikana navigointiin, jolloin opasteet ja palveluiden sijainnit ovat tiedonlähteitä (King ja Lunenfeld 1971). Tiegeometrialla ei voida juurikaan vaikuttaa strategisella tasolla, mutta sillä voidaan eniten vaikuttaa taktisen ja operationaalisen tason tehtäviin. Mm. tiegeometrian kokeminen vaikuttaa kuljettajan taktisen tason päätöksiin, kuten nopeuden valintaan ja siihen miten hän ennakoi tulevaa. Operationaalisen tason tehtävät liittyvät ajoneuvon ohjaamiseen ja nopeuden säätelyyn. Tärkein tarvittava tieto liittyy auton sijaintiin ja sivuttaissijainnin muutoksiin ajoradalla.

Keskisen (2003) laajentaman kuljettajan liikennekäyttäytymisen hierarkiamallin (kuva 1) mukaan ylemmillä hierarkiatasoilla tapahtuvat tietoiset tai tiedostamattomat valinnat vaikuttavat kuljettajan toimintaan yksittäisissä liikennetilanteissa. Hierarkiamallin pohjalle on rakennettu kuljettajakoulutuksen tavoitteita esittävä GDE-malli (Goals for Driver Education) (Hatakka, Keski-



nen, Gregersen, Glad ja Hemetkoski 2002). Siinä kuten myös ennakoivan ajon pelivaramallissa (mm. Schrey ja Anteroine 1991) tuodaan keskeisesti esille riskien tunnistamisen taito. Kuljettajan tulisi aktiivisesti havainnoida liikennenympäristöä riskien tunnistamiseksi. Ajoneuvon hallinnan tason tiehen liittyvästä havainnoinnista ja ajamisen sovittamisesta havaitun mukaiseksi muodostuu tottumuksen myötä rutiinia. Ajorutiini sisältää erityyppisiin tieympäristöihin liittyviä automatisoituneita toimintamalleja. Nämä pääosin tiedostamattomat tottumukset ovat niin vahvoja, että ne pyrkivät voittamaan jatkuvaa tietoista kontrollia vaativat ylemmän tason tiedot esimerkiksi nopeusrajoituksista. Alhainen nopeusrajoitus hyväkuntoisella, leveällä ja suoralla tiellä johtaa helposti tunnollisemmankin kuljettajan ajonopeuden vähittäiseen kasvuun. Oleellista onkin, ettei tiegeometrian tarjoama informaatio tukeeta tien tavoiteltua käyttötarkoitusta ja nopeutta niin selkeästi, etteivät muiden hierarkiatasojen tiedot johda väärin ratkaisuihin esimerkiksi liikennetilanteiden hallinnassa. Tiegeometrian tulisi myös olla helposti havaittavaa ja ennakoitavaa, jotta kuljettaja voi jättää alimman tason informaation käsittelyn automatisoituneiden rutiinien varaan ja keskittää huomionsa muiden riskien havaitsemisen ja ennakointiin.



Kuva 1. Liikennekäyttäytymisen hierarkiamalli (Keskinen 2003)

Kuljettajille tulisi ajon aikana antaa tietoa seuraavien periaatteiden mukaan (Allen, Lunenfeld ja Alexander 1971) (yttimekkäät englanninkieliset ilmaisut on tarkoituksella jätetty kääntämättä):

1. "First thing first"(primacy)
2. "Do not overload" (processing channel limitations)
3. "Do it before they get on the road" (a priori knowledge)
4. "Keep them busy"(spreading)
5. "Do not surprise them" (expectancy)

Nämä periaatteet on hyvä pitää mielessä tarkasteltaessa tiegeometrian vaikutusta ajokäyttäytymiseen.



## 4.2 Nopeuden hahmottaminen ja valinta

Nopeuden aistimisen perustana on suhteellisen liikkeen aistiminen. Käsitys omasta ajonopeudesta perustuu ennen kaikkea ajoneuvon liikkeeseen suhteessa ympäristöön. Kuljettaja saa tietoa liikennetilanteesta ja ajoneuvon liike-tilasta näkö-, tunto- ja kuuloaistien avulla, tiegeometriaa ajatellen tässä tärkeysjärjestyksessä (Björkman & Karlsson 2006). Useimmiten kuljettajat aliarvioivat oman todellisen nopeutensa.

Tiegeometrialla voidaan vaikuttaa ajonopeuden valintaan. Ajokokemuksen myötä kuljettajalle kertyy olettamuksia siitä, mikä kussakin ympäristössä on sopiva ajonopeus. Suomessa on opittu tieluokkien mukaiseen standarditasoon ja tien oletetaan jatkuvan samantasoisena (expectancy). Nämä odotukset tien suuntauksesta (erityisesti linjauksesta) ja tasosta sekä ajo-olosuhteista ohjaavat kuljettajan nopeudenvallintaa yhdessä muiden tekijöiden (nopeusrajoitus, keli, muut liikkujat) kanssa. Tieympäristön pitäisi tukea nopeusrajoitusta. Esimerkiksi tien leveys vaikuttaa ajonopeuteen merkittävästi (Erath & Frölich 2004). Tyypillisillä maanteillä poikkileikkaus selittää valittua ajonopeutta paremmin kuin mäkisyyys, kaarteisuus tai liittymätiheys (Räsänen J. 1990).

Edellä mainittujen asioiden lisäksi ajonopeuden valintaan vaikuttavat monet muut tieympäristön elementit. Seuraavat asiat johtavat suurempiin nopeuksiin (suluissa vaikutus onnettomuusriskiin) (Tiehallinnon selvityksiä 58/2004):

- reunaviivat
- keskiviiva kapeilla teillä (lisää riskiä)
- tehostettu informaatio linjauksesta pimeässä (lisää riskiä)
- tievalaistus (pienentää riskiä)

Seuraavat toimenpiteet ja elementit puolestaan johtavat pienempiin nopeuksiin:

- tien varrella olevat puut, rakennukset ja muut rakennelmat, erityisesti kapeilla teillä
- taajamaportit ja muut taajamamaisuutta viestivät asiat (esimerkiksi hoidettu/rakennettu vs. luonnonympäristö)
- rajoitettu näkemä (ei lisää kuitenkaan turvallisuutta kaarteissa)
- muut visuaaliset keinot (esimerkiksi kaarteiden korostus tiemerkin-  
nön lisää nopeuden tunnetta)

Näiden tekijöiden vaikutus tulee ottaa huomioon tutkittaessa tiegeometrian vaikutuksia ajokäyttäytymiseen.

## 4.3 Kuljettajan kuormittuminen (Driver Workload)

Informaation käsittelystä aiheutuvalle kuljettajan kuormitukselle (workload) on useita määritelmiä. Fitzpatrick ym. (2000) siteerasivat Knowlesin (1963) määritelmää kuormitukselle, joka perustuu kahteen kysymykseen:

*“Kuinka paljon huomiota vaaditaan?” ja “Kuinka hyvin käyttäjä pystyy suorittamaan lisätehtävistä?”*

He totesivat sen sopivan hyvin liikenneympäristössä käytettäväksi, koska liikenneympäristö sisältää useita samanaikaisia tehtäviä, joista jokainen vaatii tietyn määrän kuljettajan huomiosta. Kuormittumisen kasvaessa kuljettajan on todettu muuttavan ajamistaan siten, että kuormitus vähenee, kuten hidastavan nopeutta, jotta päätösten tekoon jää enemmän aikaa ja kuljettaja tuntee olonsa turvallisemmaksi.

Messer (1980) esitti, että kuljettajan kuormittuminen lisääntyy näkemän lyhentyessä ja tien geometristen ominaisuuksien monimutkaistuessa. Esimerkiksi kaarteeseen ja kuperan pyörästyskaaren yhdistelmä voi lisätä kuljettajan kuormittumista kahdella tavalla: näkemän lyhenemisellä ja kuljettajan tarpeella hallita ajoneuvonsa kolmiulotteisessa tilassa. Jos tähän lisätään vielä jokin yllättävä tapahtuma, kuten vastaantuleva auto näkemän ollessa lyhimmillään, lisää se kuormittumista entisestään.

Lisäksi he totesivat kuljettajan kuormituksen olevan lupaava tapa mitata suunnittelun johdonmukaisuutta. Johdonmukainen suunnittelu auttaa kuljettajaa ennakoimaan seuraavia tapahtumia ja valmistautumaan tarvittavaan toimintaan. Tiegeometria ei kuitenkaan ole ainoa asia joka vaikuttaa kuormittumisen määrään. Esimerkiksi kanssamatkustajat, matkapuhelimeen puhuminen tai poikkeuksellisen tapahtuma voivat lisätä kuljettajan kuormitusta, joka johtaa usein tiedostamattomaan nopeudenvähennykseen. Suunnittelun johdonmukaisuutta mitattaessa onkin oleellista varmistaa, että kuormittuminen aiheutuu nimenomaan tiegeometriasta.

Kuljettajan kuormittuminen katsotaan usein pelkästään haitaksi. Toisaalta myös liian vähäinen kuormitus voi olla ongelma ja johtaa tarkkaavaisuuden herpaantumiseen ajotehtävästä. Summala (2001) totesi, että hyvällä leveällä tiellä alhaisella nopeudella ajaminen merkitsee kokeneelle autoilijalle varsin yksitoikkoista tehtävää, jossa on kaksi vaaraa. Ensinnäkin on suuri houkutus käyttää aikaa muuhun puuhasteluun, joka saattaa johtaa ongelmiin, esimerkiksi yhtäkkiseen ylikuormitukseen ja onnettomuuteen, jos tarkkaavaisuutta ei osata jakaa oikein. Toisaalta uhkaa alentunut vireystaso, joka voi aiheuttaa ongelmia tarkkaavaisuuden ylläpitämisessä ja torkahtelua, mikä taas saattaa johtaa joko ulosajoon tieltä tai vastantulevan kaistalle. Kuormittumista tutkittiin mm. seuraamalla kuljettajan katsetta, kun hänelle annettiin ajamisen lisäksi muita tarkkaavaisuutta vaativia tehtäviä.

USA:ssa koottiin tiegeometrian monotonisuuden vaikutuksia koskevia arvioita eri tutkimuksista viimeisten 15 vuoden ajalta (US Dot 2007). Niiden mukaan:

- Valtateiden monotonisuuden vuoksi kuljettajien nukahtamisriski yöaikana ajettaessa on erityisen korkea
- Pitkämatkaisessa osavaltioiden välisessä liikenteessä tapahtuvista onnettomuuksista 40 % väsymys on ollut merkittävä osasy
- Suorilla tieosuuksilla ajavien toimintakyky alenee nopeammin kuin mutkaisilla teillä ajavien
- Nukahtamisesta johtavista onnettomuuksista 40 % tapahtuu hyvillä päätteillä
- Erään arvion mukaan maaseudulla tapahtuvista liikenneonnettomuuksista 30 % johtuu osittain kuljettajien väsymyksestä



- Erään päiväkirjatutkimuksen mukaan yhdysvalloissa kuljettajat kokevat ajaessaan väsymystä yleisemmin kuin norjalaiset, minkä tulkittiin pitkälti johtuvan tiegeometrian ja tieympäristön eroista maiden välillä
- Yksitoikkoisuuden aiheuttama tarkkaavaisuuden huononeminen voi johtua suorien, monotonisten ja vähäliikenteisten teiden antamista vähistä virikkeistä
- Simulaattoritutkimuksen mukaan väsymys ilmenee selvästi nopeammin monotonisilla ja vähän ajajalta vaativilla tieosuuksilla.

#### 4.4 Linjauksen johdonmukaisuus

Autolla ajaminen on jo sinänsä vaativa tehtävä, joten tiensuunnittelun keinoin on pyrittävä välttämään kaikkia turhia yllätyksiä. Wooldridge ym. (2003) esittivät kyselytutkimuksen perusteella suunnittelun johdonmukaisuudelle seuraavan määritelmän:

*"Design consistency is the conformance of a highway's geometric and operational features with driver expectancy."*

Jos tarkastellaan pelkästään linjaosuuksia, voidaan linjauksen johdonmukaisuudella olettaa tarkoitettavan sitä, että linjauksen geometriset ominaisuudet vastaavat kuljettajan odotuksia kyseisestä tielinjasta. Vaaka- ja pystygeometrian on muodostettava yhtenäinen ja ennustettava kokonaisuus, joka antaa kuljettajalle oikean informaation hyvissä ajoin (Nilsson ym. 1989).

Lisähaasteen linjauksen johdonmukaisuusvaatimukselle tuo yleistynyt vakionopeussäätimen käyttö. Tavallisesti kuljettaja reagoi lähes huomaamattaan tiegeometrian pieniin poikkeuksiin kaasua hellittämällä, mutta vakionopeuden säädintä käyttävällä kynnys nopeuden alentamiseen on selvästi suurempi. Tällöin pyritään ajamaan säädetyllä vakionopeudella koko tiejakso.

Linjauksessa käytetyt epäjohdonmukaiset ratkaisut ja ratkaisujen yhdistelmät asettavat kuljettajille suurempia vaatimuksia, jotka johtavat kuljettajien suurempaan riskiin tehdä virheitä päätöksenteossa. Tämä taas johtaa kasvavaan onnettomuusriskiin. Toisaalta johdonmukaiset ratkaisut sallivat kuljettajien tehdä päätöksensä rauhassa ilman ylimääräistä räsistystä. On siis tavoiteltavaa pyrkiä suunnittelemaan teitä, jotka eivät yllätä kuljettajaa eikä anna kuljettajalle mahdollisesti harhaanjohtavaa ja onnettomuusriskiä lisäävää tietoa.

Menetelmät hyvän suunnittelun ja sitä kautta linjauksen johdonmukaisuuden määrittelemiseen ovat vasta kehitysvaiheessa, eikä yhtä ainoaa oikeaa tapaa ole vielä löydetty. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että vaikka yksittäinen tielinjan elementti (yleensä kaarre) olisikin mitoitusnopeuteen nähden sopiva, ei se välttämättä enää toteutuneiden nopeuksien kohdalla olekaan sitä. Tämä johtuu monesti esimerkiksi liian pitkistä suorista kaarteiden välillä, jolloin nopeudet saattavat nousta suuremmiksi kuin tien mitoitusnopeus. Mitoitusnopeus määrittyy useimmiten kaarteiden perusteella, joissa ajonopeudet eivät voi olla yhtä suuria kuin suorilla.

Yksi yleisesti käytössä oleva menetelmä suunnittelun johdonmukaisuutta arvioitaessa on kolmeen kriteeriin perustuva menetelmä (Lamm 1999, tauluk-



ko 4). Muuttujina tässä ovat mitoitussopeuden ja 85-prosentin nopeuden ero ( $|V_{85} - V_D|$ ), 85-prosentin nopeuden muutos peräkkäisten elementtien välillä ( $\Delta V_{85}$ ) ja oletetun kitkan  $f_R$  ja vaadittavan kitkan  $f_{RD}$  ero ( $f_R - f_{RD}$ ). Täysin luotettavaa ja varsinkaan jokaiseen tilanteeseen sopivaa mallia 85-prosentin nopeudelle on mahdotonta tehdä, mikä tarkoittaa epäluotettavuutta tähän nopeuteen perustuviin arviointikriteereihin (85-prosentin nopeuden määrittämiseen tehtyjä malleja on esitetty luvussa 5 sekä liitteissä 1 ja 2).

Taulukko 4. Suunnittelun arviointikriteerit (Lamm ym. 2002)

DESIGN EVALUATION	$ V_{85} - V_D $	$\Delta V_{85}$	$f_R - f_{RD}$
GOOD	$\leq 10\text{km/h}$	$\leq 10\text{km/h}$	$\geq 0,01$
FAIR	$10\text{km/h} <  V_{85} - V_D  \leq 20\text{km/h}$	$10\text{km/h} < \Delta V_{85} \leq 20\text{km/h}$	$0,01 > f_R - f_{RD} \geq -0,04$
POOR	$\geq 20\text{km/h}$	$\geq 20\text{km/h}$	$< -0,04$

## 5 TIEGEOMETRIAN VAIKUTUS AJOKÄYTTÄYTYMISEEN

Seuraavassa on tarkasteltu tiegeometristen menettelyjen ja tekijöiden vaikutuksia ajokäyttäytymiseen eri tutkimusten (Suomi, Eurooppa, ja Pohjois-Amerikka) tulosten pohjalta.

### 5.1 Linjaus

#### 5.1.1 Vaikutus ajonopeuden valintaan

Perco (2007) tutki tielinjan yleisilmeen vaikutusta ajonopeuksiin 2-kaistaisilla maanteilla Italiassa. Tutkimuksen perusteella hän määrittä nopeusennustemallit kaarteisuudeltaan erilaisille tieosuuksille. Tielinjan homogeenisuuden tunnistamiseen hän käytti kaarteisuutta (CCR), jota ensimmäisenä on käytetty saksalaisissa ohjeissa (Richtlinien für die Anlage von Strassen: Linienführung RAS-L. Forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen, Saksa, 1995). Suomessa kaarteisuutta on käytetty kuvaamaan tieosuuden yleistä laatua, ei niinkään osoittamaan yksittäisiä tien yleisilmeestä poikkeavia kohteita. Kaarteisuus määritellään jakamalla tielinjan geometristen elementtien kulmanmuutosten itseisarvojen summa tieosuuden kokonaispituudella (kaava 3).

$$CCR = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (3)$$

missä

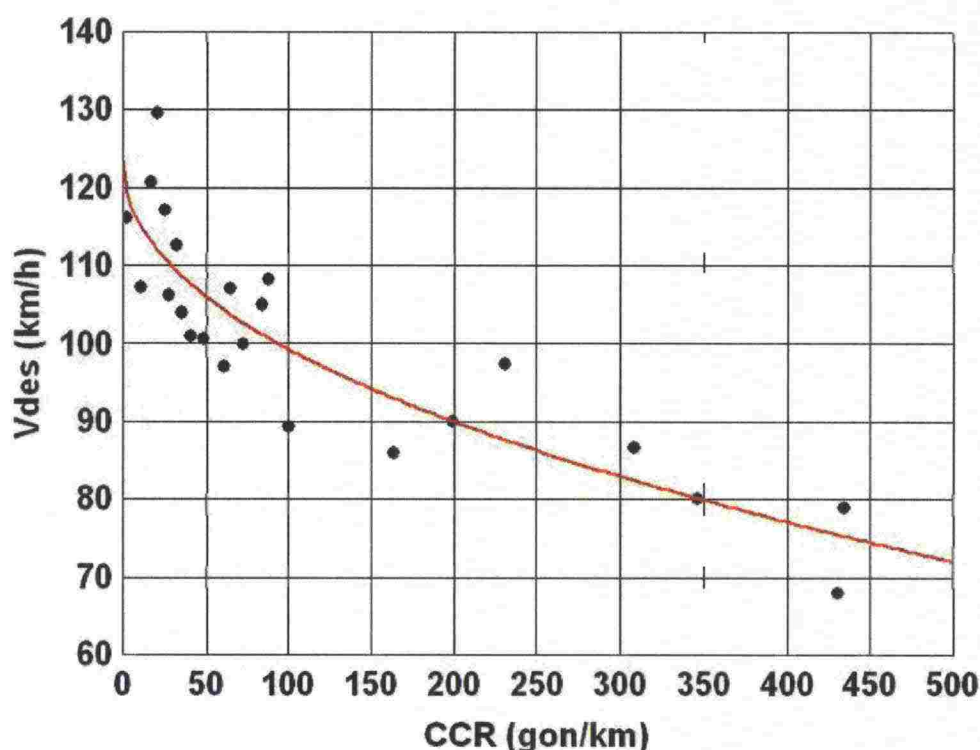
CCR	= kaarteisuus (gon/km)
$y_i$	= geometrisen elementin $i$ kulmanmuutos (gon)
$L_i$	= geometrisen elementin $i$ pituus (km)
$n$	= geometristen elementtien lukumäärä tieosuudella (suorat, kaarteet ja siirtymäkaaret)

Saksalaisessa menetelmässä nopeus ajatellaan vakioksi tarkasteltavan homogeenisen tieosuuden matkalla, jossa kuitenkin saattaa olla hyvinkin erisäteisiä kaarteita, joissa todellisuudessa ajetaan erilaisilla nopeuksilla. Sen takia tässä tutkimuksessa määritetyissä nopeusennustemalleissa on otettu huomioon myös kaarresäde. Ennustenopeus voidaan näin laskea mille tahansa tielinjan elementille, eikä pelkästään yhdelle osuudelle.

Tavoitenopeuden ( $V_{des}$ ), eli nopeustason, jolla kuljettaja pyrkii ajamaan ja johon vaikuttavat tien, ajoneuvon ja kuljettajan ominaisuudet sekä liikennetilanne (McLean 1989, Kiljunen & Summala 1996), laskemiseksi tutkimuksessa määritettiin seuraava kaava, joka myös ottaa huomioon kaarteisuuden:

$$V_{des} = 123,54 - 2,79 \times CCR^{0,47}, (R^2=0,77) \quad (4)$$

Tavoitenopeuden voidaan ajatella olevan 85-prosentin nopeus suoralla tieosuudella tai erittäin suurisäteisissä kaarteissa (Suomessa käytössä oleva kaava tavoitenopeuden määrittämiseen löytyy Tiehallinnon ohjeesta Tielii-kenteen ajokustannusten laskenta, 2005). Kuvassa 2 on esitetty tavoitenopeuden ja tieosan kaarteisuuden välinen riippuvaisuus.



Kuva 2. Tavoitenopeuden ja kaarteisuuden välinen riippuvuus. (Perco 2007)

Tutkimuksessa selvisi, että suurin korrelaatio 85-prosentin nopeuden kanssa oli kaarresäteiden neliöjuuren käänteisluvulla  $1/R^{0.5}$ . Tätä on käytetty myös joissain aiemmin kehitetyissä nopeusennustemalleissa (esimerkiksi Fitzpatrick ym. 2000). Muita aiemmin määritettyjä nopeusennustemalleja on liitteessä 1. Yksittäisen kaarekohdan nopeusennustemalli, joka parhaiten kuvasi kaikkia tutkimusalueen tieosuuksia, oli seuraava:

$$V_{85} = 121,78 - \frac{544,78}{\sqrt{R}}, \quad (R^2=0,79) \quad (5)$$

Mallin keskineliövirhe on 8,30.

Tämän yhtälön pohjalta määritettiin neljä erilaista nopeusennustemallia riippuen kaarteisuudesta (taulukko 5). Linjaus on sulava, kun tiellä on pitkiä suoria ja suurisäteisiä kaarteita, jotka eivät merkittävästi rajoita nopeutta ja kaarteisuus  $CCR < 30$  gon/km (kaarteisuus 30 gon/km vastaa yhtä kilometrin mittaista ympyränkaarta, jonka kaarresäde  $R \approx 2100$  m). Mutkittelevassa linjauksessa on lyhyitä suoria ja pienisäteisiä kaarteita, jotka merkittävästi rajoittavat nopeutta ja  $CCR > 160$  gon/km (kaarteisuus 160 gon/km vastaa yhtä kilometrin mittaista ympyränkaarta, jonka kaarresäde  $R \approx 400$  m). Muut kaksi kaarteisuuden CCR vaihteluväliä ovat 30-80 gon/km ( $R \approx 2100$ -800 m) ja 80-160 gon/km ( $R \approx 800$ -400 m).



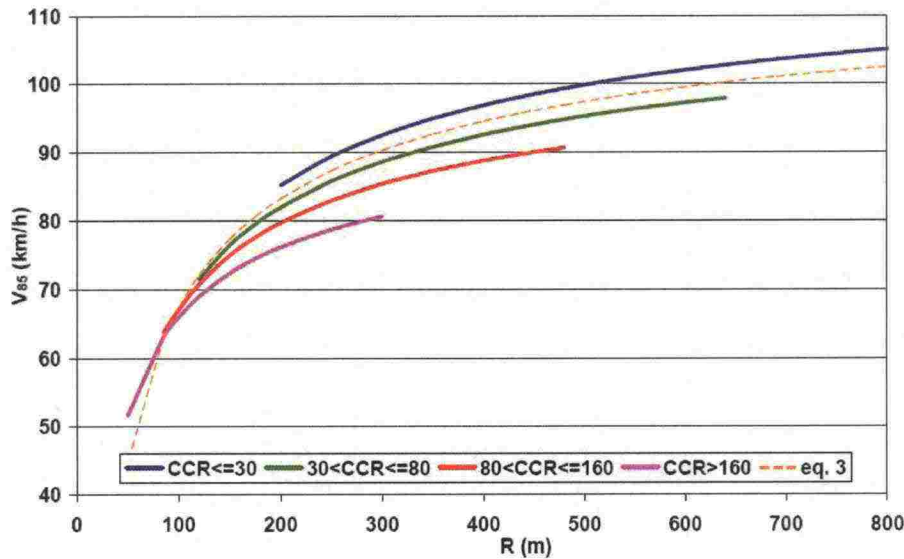
*Taulukko 5. Nopeusennustemallit eri kaarteisuusluokille. (Perco 2007)*

	CCR	Tavoite- nopeus (kaava 4)	Kaar- resäde	Otos- koko	Ennustemalli	Seli- tysaste	Kes- kine- liövirhe	Kes- kineliövirhe (kaava 5)
	1	2	3	4	5	6	7	8
	gon/km	km/h	m	n	km/h	-	km/h	km/h
1	< 30	> 110	200 - 2500	38	$V_{85} = 124,08 - \frac{563,78}{\sqrt{R}}$	0,4	10,06	11,45
2	30 - 80	110 - 100	100 - 635	43	$V_{85} = 118,11 - \frac{510,56}{\sqrt{R}}$	0,58	6,23	6,43
3	80 - 160	100 - 90	77 - 480	20	$V_{85} = 111,65 - \frac{437,44}{\sqrt{R}}$	0,8	4,3	5,55
4	> 160	< 90	36 - 300	18	$V_{85} = 100,85 - \frac{346,62}{\sqrt{R}}$	0,89	3,09	6,18

Selitysaste paranee, kun kaarteisuus CCR kasvaa. Tämä johtuu siitä, että nopeuden valinta on rajoitetumpaa tieosuuksilla, joilla on lyhyitä suoria ja jyrkkiä kaarteita. Tieosuuksilla, joissa on pitkiä suoria ja loivia kaarteita, nopeus on vapaammin kuljettajan valittavissa.

Keskineliövirheestä huomataan, että se on kaikissa neljässä yhtälössä pienempi kuin kaavalla 5 laskettaessa. Tämä korostaa yhden yhtälön riittämättömyyttä nopeutta ennustettaessa.

Kuvassa 3 on taulukon 5 yhtälöistä sekä kaavasta 5 (eq.3) piirretyt kuvaajat. Jokainen kuvaaja kuvaa yhtä kaarteisuuden vaihteluväliä.



*Kuva 3.  $V_{85}$ :n ja kaarresäteen välinen yhteys eri kaarteisuusluokissa. (Perco 2007)*

Kuvat 2 ja 3 näyttävät, että tien linjauksella on selvä vaikutus nopeuteen. Kuvasta 3 nähdään, että yhdellä vakioarvolla on mahdotonta kuvata tavoite-nopeuden valintaa, vaan se on riippuvainen myös linjauksen yleisluonteesta. Samoin kuvasta 3 nähdään, että yksi yhtälö (eq.3) ei ole riittävä ennustamaan tarkasti kaarrenopeuksia.

Ottesen ja Krammes (2000) määrittivät nopeusprofiilimallin suunnittelun johdonmukaisuuden arviointia varten. He selvittivät nopeuden hidastumista lähestyttäessä kaarretta. Tutkimuksen yhteydessä selvisi seuraavia ajokäyttäytymiseen liittyviä seikkoja:

- Kaarteen jyrkkyyden lisäksi kaarteen pituudella ja kääntökulmalla oli tilastollisesti merkittävä vaikutus kaarrenopeuksiin.
- Mikään seuraavista ei ollut tilastollisesti merkittävä kaarrenopeuden ennustaja: näkemä, kaarretta edeltävän suoran pituus, edellisen kaarteen jyrkkyys, sivukaltevuus, kaistan leveys tai päällysteen leveys.
- Suurimmassa osassa kaarteista 85-prosentin nopeus ( $V_{85}$ ) ei eronnut merkittävästi sisä- ja ulkokaarteessa.
- Kaarresäteeltään yli 435 metriä olevien kaarteiden 85-prosentin nopeus ( $V_{85}$ ) ei eronnut merkittävästi suorien vastaavasta nopeudesta.

Good (1978) teki laajan kirjallisuustutkimuksen ennen vuotta 1978 tehdystä tiegeometriasta ja kuljettajan käyttäytymistä käsittelevästä aineistosta. Tämän aineiston johtopäätöksiä olivat

- Ajoneuvojen nopeudet eivät ole vakioita läpi koko kaarteen
- Mikään yksittäinen seikka ei luultavasti kunnolla selitä kuljettajan käyttäytymistä kaarteissa.
- Mitatuista nopeuksista ja tien keskilinjan säteestä lasketut sivukitkan arvot ovat virheellisiä, koska varsinkin jyrkissä kaarteissa monet kuljettajat "oikaisevat", ja keskilinjan kaarresäde on tällöin ajatun linjan kaarresädettä pienempi.

Kanellaidis (1991) ehdotti tutkimukseensa perustuen muutoksia sivukaltevuuden laskemisperiaatteisiin kaarteissa. Hän esitti, että kaarteiden sivukaltevuus pitäisi määrittää todellisten kaarteissa havaittujen nopeuksien mukaan eikä tielinjan mitoitusnopeuden mukaan. Kuljettajan käyttäytymistä ja tiegeometrian suunnittelua koskevat tutkimukset olivat osoittaneet mitoitusnopeuskonseptin tarvitsevan uudelleenarviointia ja päivitystä. Kaarteissa-kaan ajaessaan kuljettajat eivät joko miellä tai ota huomioon mitoitusnopeutta. Nopeus on tapana valita sen mukaan mikä kulloiseenkin kaarteeseen tuntuu ajokokemuksen puolesta miellyttävältä. Tämä taas perustuu kuljettajan havainnointiin tien suuntauksesta ja poikkileikkauksesta. Kanellaidis ehdottaa lisätutkimuksia, jotta voitaisiin määrittää realistisempia kaarresäteiden ja sivukaltevuuden arvoja, jotka perustuisivat ajoneuvojen todellisiin nopeuksiin kaarteissa tielinjan mitoitusnopeuden sijasta.

## 5.2 Vaikutus ajolinjaan

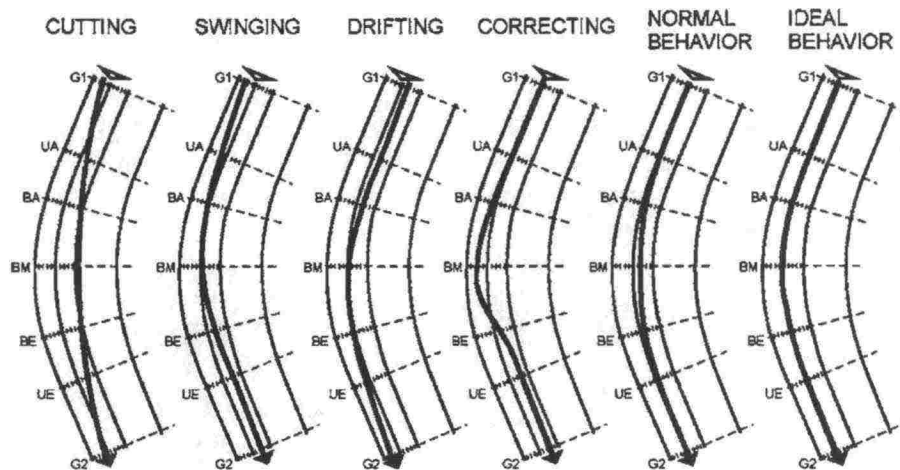
Spacek (2005) selvitti tutkimuksessaan kuljettajien ajolinjoja erilaisissa kaarteissa Sveitsissä (2-kaistainen maantie, nopeusrajoitus 80 km/h). Aiemmissä tutkimuksissa oli selvinnyt, että kaarrenopeuksista ei voida päätellä kaarteiden turvallisuutta, koska pelkän nopeuden perusteella on lähes mahdotonta erottaa seuraavaa kahta asiaa:

- Tietoinen ja tarkoituksellinen riskikäyttäytyminen, jolloin kuljettaja on valmis hyväksymään toiminnasta aiheutuvan riskin.
- Tiedostamaton, tarkoittamaton tai liian vähäisestä informaatiosta johtuva riskikäyttäytyminen.

Spacekin tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, minkälainen tiegeometria johtaa kasvaneeseen onnettomuusriskiin. Oletuksena oli, että ideaalista ja normaalista ajolinjasta poikkeava ajolinja kasvattaa onnettomuusriskiä. Ideaalin ja normaalin ajolinjan lisäksi tutkimuksessa määriteltiin neljä toisistaan poikkeavaa ajolinjaa (kuva 4) seuraavasti:

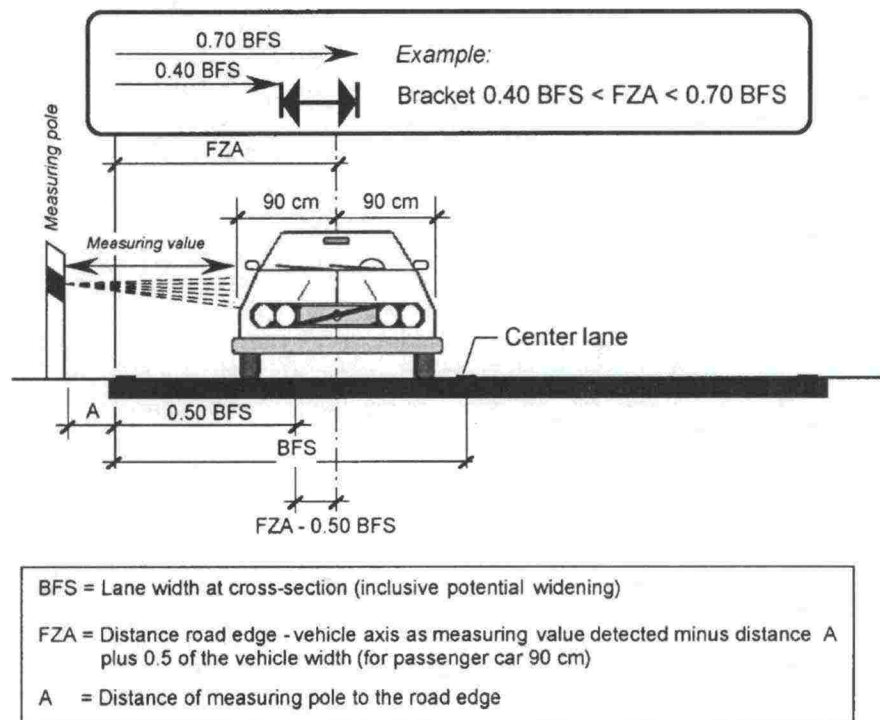
1. Ideaali (Ideal)
  - Symmetrinen ajolinja keskellä kaistaa. Vastaa suunnittelussa oletettua ajolinjaa.
2. Normaali (Normal)
  - Symmetrinen ajolinja. Muuten kuten edellinenkin, mutta kaarteissa esiintyy pientä oikomista. Ajoneuvo pysyy kuitenkin omalla kaistallaan.
3. Korjaava (Correcting)
  - S-muotoinen ajolinja, jossa ajoneuvo ajautuu ensin kohti kaarteiden ulkoreunaa, jonka jälkeen kuljettaja tekee liian suuren korjausliikkeen ja ajautuu lähelle ajoradan keskiviivaa. Oletettavasti käyttäytyminen johtuu alitajuisesta kaarteiden jyrkkyyden ja/tai pituuden aliarvioimisesta.
4. Ajelehtiva (Drifting)
  - Epäsymmetrinen ajolinja. Kuljettajalla on taipumus ajaa kaistan vasenta reunaa kaarteiden alkupuolella ja ajautua oikealle puolelle kaistaa kaarteiden loppupuolella (vasemmalle kääntyvä kaarre; analoginen ajolinja oikealle kääntyvässä kaarteessa).
5. Heilahteleva (Swinging)
  - Epäsymmetrinen ajolinja. Kuljettajalla on taipumus ajaa kaistan oikeaa reunaa kaarteiden alkupuolella ja ajautua vasemmalle puolelle kaistaa kaarteiden loppupuolella (vasemmalle kääntyvä kaarre; analoginen ajolinja oikealle kääntyvässä kaarteessa).
6. Leikkaava (Cutting)
  - Voimakkaasti oikaiseva ajolinja, joka on tietoisesti valittu keskeiskiihtyvyyden pienentämiseksi.





Kuva 4. Havainnekuvat erilaisista ajolinjoista (vasemmalle kääntyvä kaarre). (Spacek 2005)

Ajolinjojen luokitteluperiaatteet on esitetty kuvassa 5.

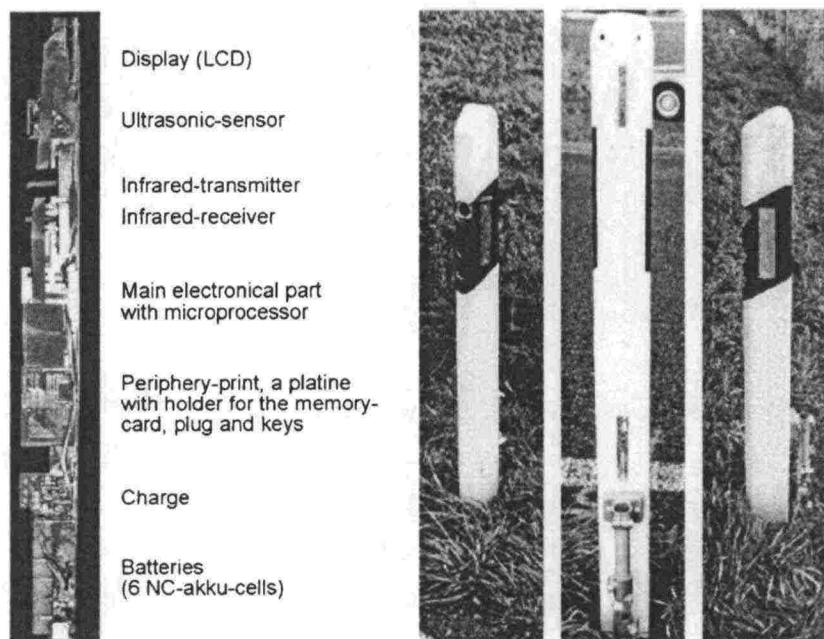


Kuva 5. Ajolinjojen luokitteluperiaatteet. (Spacek 2005)

Spacekin tutkimuksen mittauskalusto koostui 12 itsenäisestä mittausyksiköstä, jotka oli sijoitettu tavallisiin reunapaaluihin (kuva 6). Yksi mittauspaalu pystyy mittaamaan

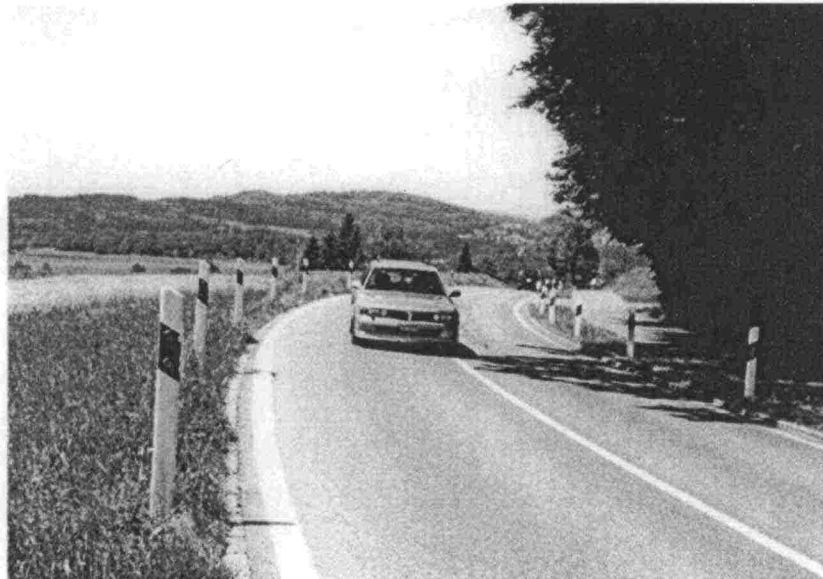
- Ajoneuvojen läpikulkuaian (ms)
- Ohiajavan ajoneuvon suunnan (2 suuntaa)
- Ajoneuvon pituuden (cm)
- Ajoneuvon kyljen etäisyyden paalusta (cm)

Lisäksi ohitusajankohtien avulla pystytään määrittämään ajoneuvon keskinopeus paalujen välillä, kun tiedetään paalujen välinen etäisyys. Ajoneuvon tunnistamiseksi paaluissa on 2 paria infrapunälähtettä ja -vastaanottimia. Ultraäänianturi on ajoneuvon poikittaisetäisyyden tarkkailua varten. Mitatut tiedot tallentuvat jokaisessa paalussa oleville muistikortteille, joista tiedot myöhemmin siirretään tietokoneelle analysoitavaksi.



Kuva 6. Mittauspaalu; vasemmalla osat ilman suojaa ja oikealla suojan kanssa useasta suunnasta. (Spacek 2005)

Paaluja asennettaessa tavalliset reunapaalut korvattiin mittauspaaluilla, jotka asennettiin mahdollisimman huolellisesti, jotta eroa tavallisiin paaluihin ei huomaa. Mittauksen aikana paikalla ei myöskään ollut tutkimuksen suorittajia (kuva 7).

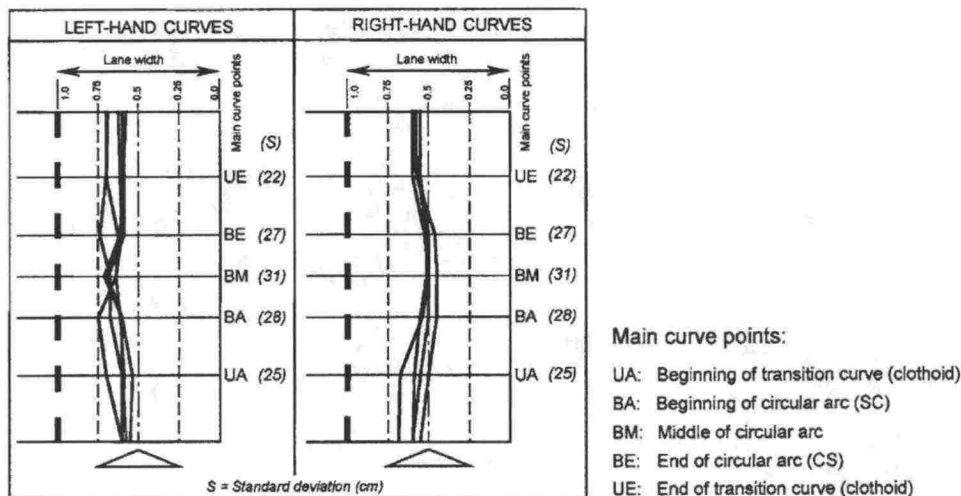


Kuva 7. Esimerkkikuva, mittauspaalut vasemmalla. (Spacek 2005)

Mittauksia tehtiin 8 kaarteessa, joiden kaarresäteet olivat 65–220 m ja kääntymiskulmat  $\sim 48$ –146 gon ( $90^\circ = 100$  gon). Pituuskaltevuudet olivat alle 3 %. Mitoitusnopeus oli osuuksilla alhaisempi kuin nopeusrajoitus (yleinen 80 km/h). Kaarteet vaihtelivat geometrialtaan ja osittain näkemäolosuhteiltaan.

Tutkimuksessa selvisi, että kuljettajat ajavat pääasiallisesti kauempana tien ulkoreunasta kuin tien keskilinjasta sekä vasemmalle että oikealle kääntyvissä kaarteissa. Tämä pätee useimmiten riippumatta päällysteen leveydestä. Ajolinjoissa on kuitenkin eroja riippuen siitä kääntyykö kaarre vasemmalle vai oikealle. Vasemmalle kääntyvissä kaarteissa ajolinja on lähempänä tien keskilinjaa ja oikealle kääntyvissä kaarteissa kaistan keskilinjaa. Oikealle kääntyvissä kaarteissa ajoneuvot säilyttävät ajolinjansa paremmin kaistan keskellä kaarteiden keskimmaisella kolmanneksella ja vasemmalle kääntyvissä kaarteissa ensimmäisellä ja viimeisellä kolmanneksella (kuva 8).





Kuva 8. Keskimääräisten ajolinjojen hajonta vasemmalle ja oikealle kääntyvissä kaarteissa. (Spacek 2005).

Taulukossa 6 on esitetty ajolinjojen eri luokkien jakauma prosentteina tarkastelluissa kaarteissa.

Taulukko 6. Ajolinjojen jakauma eri luokkiin (%) tarkastelluissa kaarteissa (Spacek 2005).

Track type (%)	Left-hand curves no.					Right-hand curves no.				
	1 R=65 m	3 R=70 m	4 R=79 m	4 N <sup>a</sup> R=79 m	6 R=143 m	2 R=65 m	5 R=115 m	5 N <sup>a</sup> R=115 m	7 R=220 m	8 <sup>b</sup> R=195 m
Ideal behavior (I)	0.5	1.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.9	0.8	1.1	0.2
Normal behavior (N)	9.8	20.0	34.8	22.5	7.0	8.9	48.2	36.3	33.3	18.1
Correcting (K)	5.4	0.0	2.1	0.6	2.8	1.2	3.1	4.9	0.2	11.5
Cutting (C)	33.9	48.0	31.1	27.2	18.6	28.7	8.1	16.7	12.2	44.9
Swinging (S)	9.3	0.0	7.3	4.7	4.4	5.9	6.4	4.9	0.0	0.0
Drifting (D)	1.8	5.0	0.7	0.6	8.0	4.9	2.7	5.9	3.6	3.2
Remaining track paths	39.3	26.0	23.6	43.8	59.2	50.4	30.6	30.5	49.6	22.1

<sup>a</sup>Measurements by night.

<sup>b</sup>Curve with increased accident frequency (% of track types in both driving directions).

Pienisäteisissä kaarteissa ( $R \leq 120$  m) paikallinen keskeiskiihtyvyys nousee havaituilla nopeuksilla usein yli kaksinkertaiseksi verrattuna suunnitteluohjeiden arvoihin.

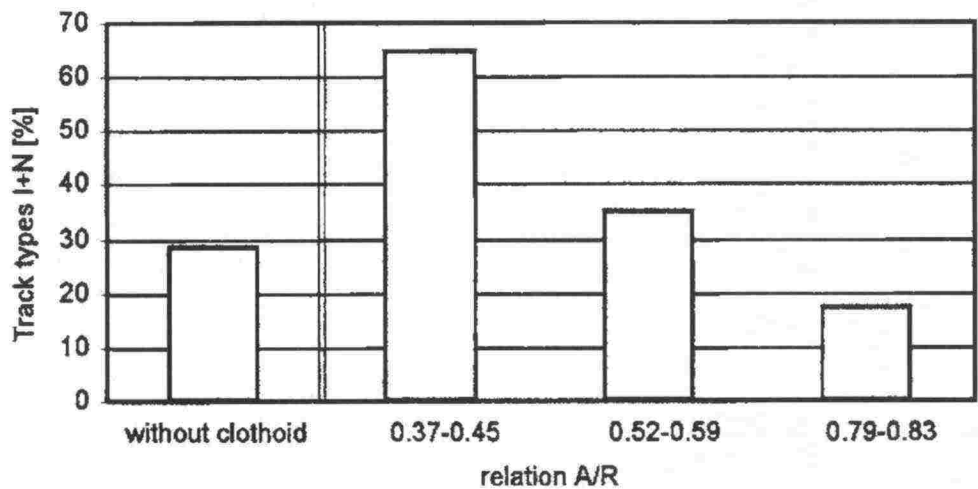
Tutkimus osoitti, että kaarteissa esiintyy erilaisia luokiteltuja ajolinjoja. Näiden ajolinjojen esiintymistiheys vaihteli huomattavasti kaarteiden välillä. Seitsemässä tutkitussa kaarteessa (ajosuunnat erikseen) ajolinjoista keskimäärin 36 % (16 - 53 %) oli "ei haluttuja" (ajolinjat 3, 4, 5 ja 6) ja suurin osa näistä oli tyyppiä 6. Ideaalia ajolinjaa 1 ei esiintynyt juuri lainkaan.

Suurimmat nopeudet mitattiin ajolinjatyypeissä 6 (vasemmalle kääntyvä kaarre) ja 5 (oikealle kääntyvä kaarre). Vaikka on oletettu, että näitä ajolinjoja käytetään keskeiskiihtyvyyden pienentämiseksi, kävi ilmi, että juuri näillä ajolinjoilla mitattiin suurimmat keskeiskiihtyvyyden keskiarvot. Eli oikaisemiseen joutuvat turvautumaan kuljettajat, jotka ajavat selvästi liian suurella nopeudella kaarteeseen. Pääasiassa alhaisimmat nopeudet mitattiin tyyppin 2 ajolinjoilla.

Tutkimuksen mukaan eniten haluttuja ajolinjoja (ideaali ja normaali, tyypit 1 ja 2) esiintyy seuraavien olosuhteiden vallitessa:

- Kaarresäde  $\sim 120 - 230$  m
- Klotoidin parametri  $A \sim 0,33R - 0,5R$  (kuva 9)
- Kaarteen pituus vähintään 5 sekunnin ajomatkaa vastaava
- Kaistan leveys  $\sim 3,4 - 3,5$  m kaarteen keskikohdassa

#### Average proportions of track types I+N in relation to A/R



Kuva 9. Haluttujen ajolinjojen osuuden riippuvaisuus klotoidin parametrin ja kaarresäteen suhteesta A/R (Spacek 2005).

Yksi Spacekin tutkimuksen löydöksistä oli, että suistumisten ja muiden kaarteissa yleisten yhden ajoneuvon onnettomuuksien ei voida sanoa johtuvan yksinomaan liian suurista nopeuksista. Ajolinjan korjauksella on näissä onnettomuuksissa merkittävä vaikutus, koska se lisää ajoneuvoon kohdistuvaa keskeiskiihtyvyyttä ja näin altistaa onnettomuuksille. Tutkimuksesta ei kuitenkaan käy selville kuinka suuri osa ajolinjan korjauksista itse asiassa johtuu juuri liian suuresta nopeudesta. Tämän takia päätelmään on syytä suhtautua varauksella.

Huomattava on myös se, että suurimman tutkitun kaarteiden kaarresäde oli 220 m, joka on huomattavasti alle Suomen suunnitteluohjeiden minimiarvon (350 m) teillä, joiden mitoitusnopeus on 80 km/h. Tämän vuoksi tulokset pätevät ensisijaisesti vanhemmilla teillä, joilla pienisäteisiä kaarteita esiintyy.

Glennon, Neuman and Leisch (1985) mittasivat ajoneuvojen nopeuksia ja sivuttaissijaintia kaarteissa. Tutkimuksessa selvisi, että kuljettajilla on tapana arvioida kaarresäde suuremmaksi kuin se on ja näin ollen joutua tekemään kaarteissa jyrkempiä käännöksiä kuin kaarteiden geometria oikein ajettuna edellyttäisi. Yliarviointia tapahtui kaikilla nopeuksilla. Tutkijat totesivat, että jo suora tieosuus ennen kaarretta on alue, jossa kuljettajat alkavat säädellä nopeuttaan ja sijaintiaan ajoradalla. Tämä tapahtuu yleensä noin 60 metriä (200 jalkaa) ennen kaarteiden alkamista. Ajassa mitattuna se tarkoittaa noin 3 sekunnin ajoaikaa 80 km/h ajonopeudella. Nopeuden säätely on erityisen suurta ennen jyrkkiä kaarteita.

Paolo Perco (2006) tutki **siirtymäkaaren** vaikutuksia ajokäyttäytymiseen 2-kaistaisilla maanteillä. Tutkimuksen perusteella siirtymäkaaren optimaalinen pituus olisi matka, jonka ajoneuvo kulkee kuljettajan kääntäessä ohjauspyörää normaalisti. Liian pitkä siirtymäkaari vaikeuttaa kaarteiden havaitsemista ja saa kuljettajan tekemään äkkiäisiä korjauksia ajonopeuteen ja sijaintiin ajoradalla, mikä kasvattaa onnettomuusriskiä.

Tässä tutkimuksessa siirtymäkaarena oli klotoidin sijasta Yhdysvalloissa käytetty spiraali. Näin ollen klotoidin tapaukseen tätä tulosta ei voida teoriasa suoraan yhdistää. Koska siirtymäkaarien muodot ovat käytännössä kuitenkin hyvin samankaltaisia, on hyvin todennäköistä, että tulos pätee myös klotoidien kohdalla.

### 5.2.1 Vaikutus jarrutus- ja kiihdytyskäyttäytymiseen

Fitzpatrick ym. (2000) tutkivat aikaisemmin tehdyssä nopeusprofiilimallissa (Krammes ym. 1995) käytettyjen kahden oletuksen paikkansapitävyyttä. Oletukset olivat seuraavat:

- kiihdyttäminen ja hidastaminen tehdään kaarteiden ulkopuolella
- kiihtyvyys ja hidastuvuus ovat vakioita  $0,85 \text{ m/s}^2$ .

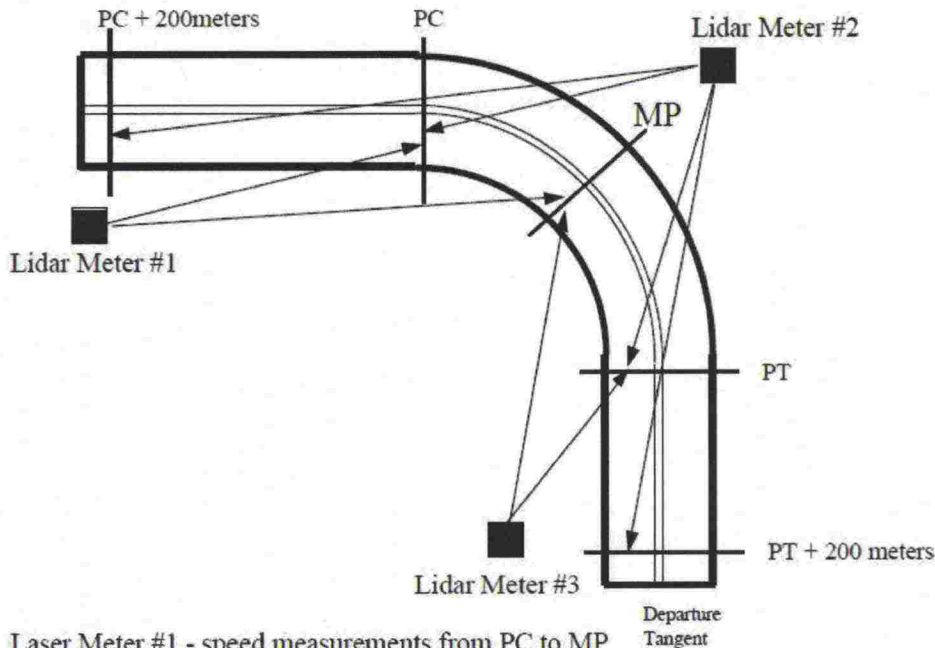
Tietoja kiihtyvyyksistä ja hidastuvuuksista kaarekohdissa kerättiin kahdesta osavaltioista (Pennsylvania ja Texas) ja tutkimuskohteita oli yhteensä 21 kappaletta. Jotta todellisia kiihtyvyyksiä ja hidastuvuuksia pystyttiin mittaamaan, kohteiksi valittuja kaarteita edeltävien suorien pituus oli vähintään 240 metriä ja pituuskaltevuus enintään  $\pm 5 \%$ . Useimmiten nopeakäyttöaste oli noin 90 km/h. Taulukossa 7 on esitetty kohteiden tarkemmat tiedot.



Taulukko 7. Tutkimuskohteiden tiedot. (Fitzpatrick ym. 2000)

Kohteen tunnus	Käännös-kulma (aste)	Kaarteen pituus (m)	Kaarre-säde (m)	Kaarretta edeltävän suoran pituus (m)
PA1	18.2	139	437	306
PA2	18.2	139	437	180
PA3	7.0	107	873	283
PA4	7.0	107	873	273
PA5	55.0	243	250	153
PA6	32.9	167	291	153
PA7	16.0	127	437	559
PA8	21.6	164	437	294
PA9	11.1	85	437	461
PA10	32.9	167	291	367
PA11	43.5	531	699	448
PA12	43.5	531	699	378
TX13	40.0	203	291	724
TX14	33.0	260	437	165
TX15	93.4	407	250	675
TX16	60.9	310	291	481
TX17	29.5	257	500	355
TX18	29.5	257	500	504
TX19	60.9	310	291	481
TX20	89.4	273	175	269
TX21	89.4	273	175	537

Nopeuksien ja sijaintien mittaukseen käytettiin Lidar-tutkia kuvan 10 mukaisesti. Mittausten luotettavuuden lisäämiseksi seurattavaksi valittujen ajoneuvojen aikaväli edellä ajaneeseen ajoneuvoon oli vähintään 5 sekuntia. Jokaisessa kohteessa tehtiin vähintään 100 mittausta ja jokaiselle ajoneuvolle tehtiin vähintään 30 nopeusmittausta mittausalueella. (PC+200 – PT+200).



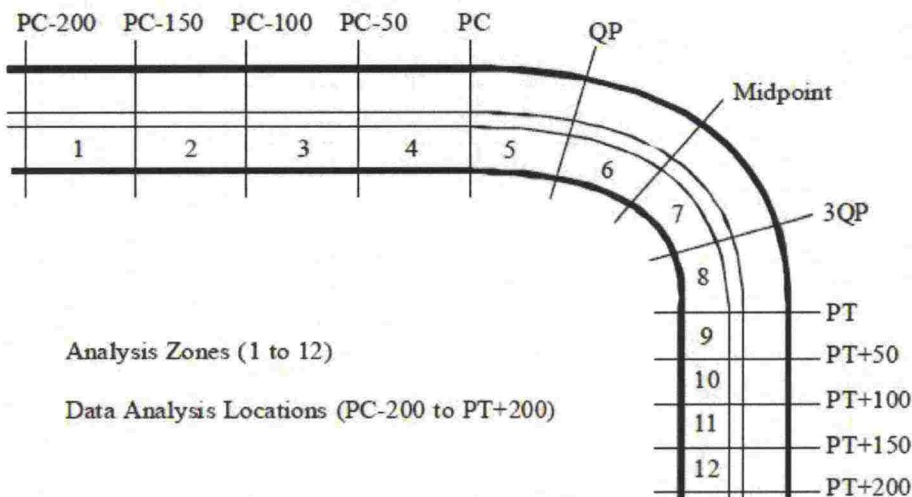
Laser Meter #1 - speed measurements from PC to MP

Laser Meter #2 - speed measurements from PC200m to PC, and PT to PT200m

Laser Meter #3 - speed measurements from MP to PT

Kuva 10. Mittausjärjestely kiihtyvyyksien ja hidastuvuuksien mittaamiseen. (Fitzpatrick ym. 2000)

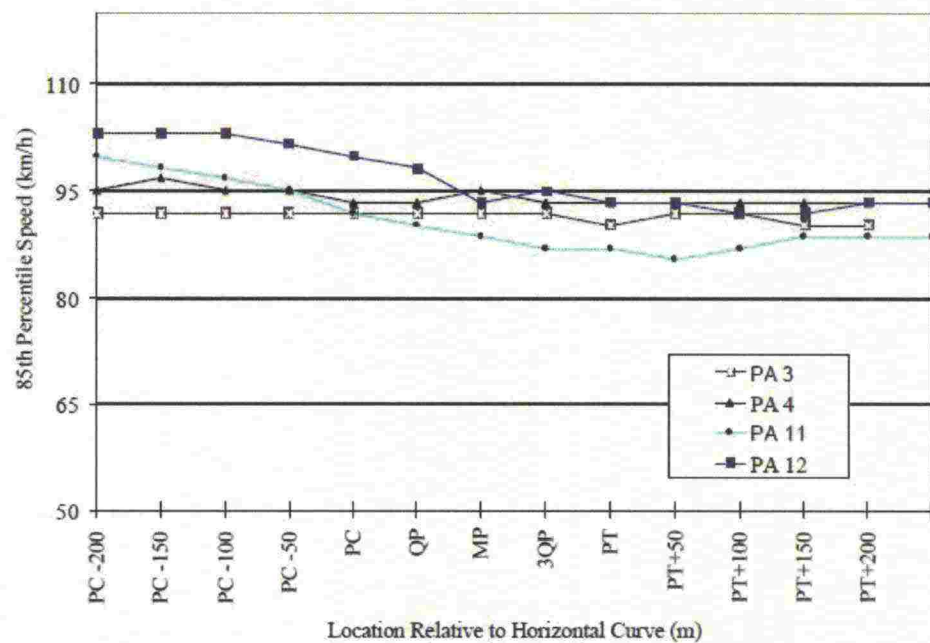
Mittaustuloksista laskettiin nopeudet kuvan 11 esittämissä 12 pisteessä. Ensimmäinen piste (PC-200) oli 200 metriä ennen kaartein alkua. Tästä eteenpäin pisteitä oli 50 metrin välein kaartein alkuun asti. Kaarteet jaettiin neljään osaan siten, että jokaisen neljänneksen alussa sekä kaartein lopussa oli piste (PC, QP, MP, 3QP, PT). Kaartein jälkeisellä suoralla pisteitä oli taas 50 metrin välein 200 metriin asti.



Kuva 11. Analyysissä käytetyt nopeudenmittauskohdat. (Fitzpatrick ym. 2000)

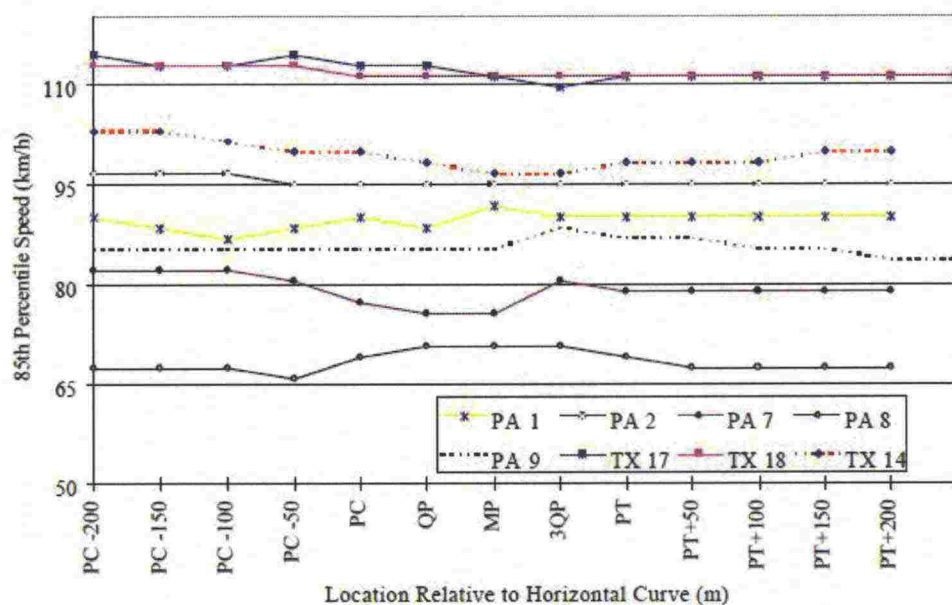
Tulosten perusteella kiihtyvyyden ja hidastuvuuden arvot eroavat tilastollisesti merkittävästi aiemmin oletetusta vakiosta  $0,85 \text{ m/s}^2$ . Kiihdyttäminen ei rajoitu pelkästään kaarteiden ulkopuolisille alueille, vaan vähäistä kiihdyttämistä ja hidastamista tapahtuu myös kaarteiden sisällä.

Kuvissa 12 – 15 on esitetty nopeus  $V_{85}$  kaarteiden eri osissa kaarresäteiden suuruuden mukaan jaoteltuina. Yleisesti näistä kuvista voidaan huomata, että nopeuden hidastumiset ovat pienempiä suurisäteisissä kaarteissa ja kasvavat huomattavasti kaarresäteiden pienentyessä. Lisäksi nopeuden minimi- ja maksimi-arvon sijainti vaihtelee laajasti kohteiden välillä. Etenkin suurisäteisten kaarteiden kohdalla hajonta on suuri.

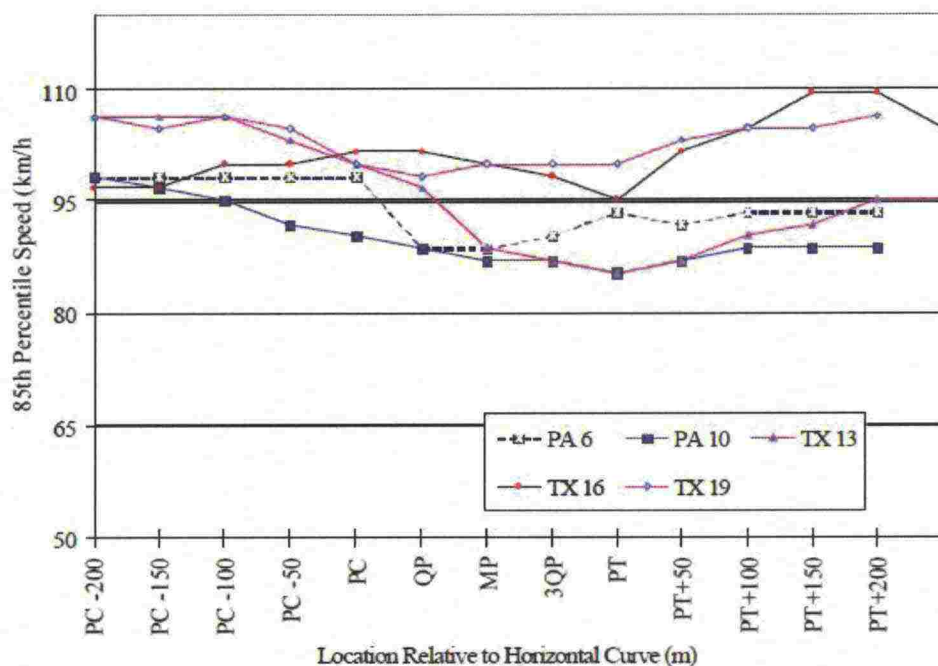


Kuva 12. Nopeusprofiilit kaarteissa, joiden säde on yli 600 m. (Fitzpatrick ym. 2000)

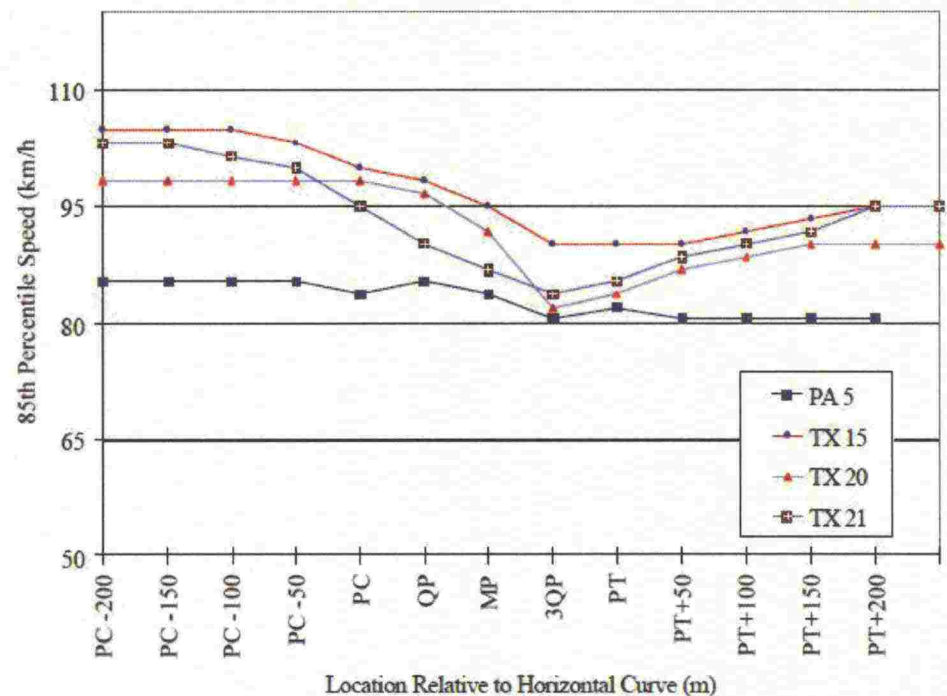




Kuva 13. Nopeusprofiilit kaarteissa, joiden säde on välillä 437–499 m. (Fitzpatrick ym. 2000)



Kuva 14. Nopeusprofiilit kaarteissa, joiden säde on 291 m. (Fitzpatrick ym. 2000)



Kuva 15. Nopeusprofiilit kaarteissa, joiden säde on alle 250 m. (Fitzpatrick ym. 2000)

Tulosten perusteella Fitzpatrick ym. kehittivät mallin kiihtyvyyksien ja hidastuvuuksien määrittämiseen. Sitä varten muodostettiin kolme skenaariota perustuen analyysiin kohteiden eri mittausvälien mittautuloksista:

Skenaario 1 – Analyysi perustuu seuraavaan kahteen mittausväliin:

- PC - 200 – kaartein keskipiste (MP)
- Kaartein keskipiste – PT+200

Skenaario 2 – Analyysi perustuu seuraavaan kolmeen mittausväliin:

- PC - 200 – kaartein alkupiste (PC)
- Kaartein alkupiste – kaartein loppupiste (PT)
- Kaartein loppupiste – PT+200

Skenaario 3 – Analyysi perustuu kiihtyvyyden ja hidastuvuuden maksimiarvoihin kussakin kohteessa.

Taulukossa 8 on esitetty kahden ensimmäisen skenaarion mukaiset havaittujen kiihtyvyyksien ja hidastuvuuksien arvot ja taulukoissa 9 ja 10 kolmannen skenaarion nopeuden  $V_{85}$  maksimi- ja minimiarvojen sijainnit sekä kiihtyvyyden ja hidastuvuuden maksimiarvot kohteittain.

*Taulukko 8. Kiihtyvyydet ja hidastuvuudet skenaarioissa 1 ja 2. (Fitzpatrick ym. 2000)*

Site	Scenario 1—Acc/Dec Rates (m/s <sup>2</sup> )		Scenario 2—Acc/Dec Rates (m/s <sup>2</sup> )		
	PC-200 to Midpoint	Midpoint to PT+200	Approach Tangent	Within Curve	Depart Curve
PA1	-0.04	0.00	-0.04	0.00	0.00
PA2	0.00	-0.08	-0.01	0.13	-0.20
PA3	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.00
PA4	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.01
PA5	-0.03	-0.04	-0.01	-0.12	0.00
PA6	-0.08	0.08	-0.04	0.00	0.05
PA7	-0.09	-0.04	-0.11	0.00	-0.05
PA8	0.07	0.08	0.01	0.02	-0.05
PA9	-0.17	-0.01	-0.20	0.00	-0.01
PA10	-0.45	0.01	-0.32	-0.14	0.05
PA11	-0.09	0.00	-0.21	0.00	0.01
PA12	-0.14	-0.01	-0.12	-0.04	0.00
TX13	-1.19	0.19	-0.44	-0.48	0.32
TX14	-0.07	0.01	-0.05	-0.01	0.01
TX15	-0.52	0.06	-0.19	-0.17	0.11
TX16	0.01	0.11	-0.11	0.00	0.04
TX17	-0.06	-0.01	-0.03	-0.05	0.00
TX18	-0.10	0.00	-0.01	0.11	0.11
TX19	-0.11	0.12	-0.19	0.00	0.21
TX20	-0.76	0.19	-0.01	-0.34	0.05
TX21	-1.10	0.37	-0.54	-0.06	0.21
Huom: Negatiivinen arvo tarkoittaa hidastamista ja positiivinen kiihdyttämistä					



Taulukko 9. Skenaario 3 - Nopeuden  $V_{85}$  maksimi- ja minimiarvojen sijainnit sekä hidastuvuuden maksimiarvot kohteittain. (Fitzpatrick ym. 2000)

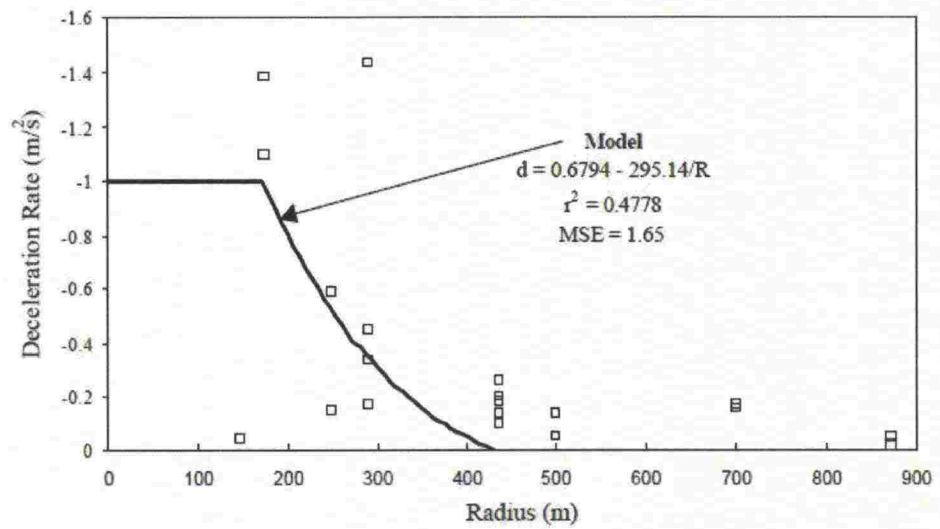
Site No. (Radius [m])	PC- 200	PC- 150	PC- 100	PC- 50	PC	QP	MP	3QP	PT	PT+ 50	Max Dec Rate (m/s <sup>2</sup> )
PA1 (147)		max							min		-0.04
PA2 (437)									max	min	-0.26
PA3 (873)			max						min		-0.05
PA4 (873)				max			min				-0.01
PA5 (250)			max					min			-0.15
PA6 (291)				max		min					-0.45
PA7 (437)	max							min			-0.14
PA8 (437)							max			min	-0.18
PA9 (437)	max				min						-0.20
PA10 (291)	max								min		-0.45
PA11 (699)	max							min			-0.16
PA12 (699)		max						min			-0.17
TX13 (291)		max						min			-1.44
TX14 (437)		max						min			-0.10
TX15 (250)		max					min				-0.59
TX16 (291)					max			min			-0.17
TX17 (499)				max				min			-0.14
TX18 (499)			max	min							-0.05
TX19 (291)			max			min					-0.33
TX20 (175)				max			min				-1.38
TX21 (175)	max						min				-1.10
Totals - max	5	5	4	4	1		1		1		20
Totals - min				1	1	2	4	8	3	2	20

Taulukko 10. Skenaario 3 - Nopeuden  $V_{85}$  maksimi- ja minimiarvojen sijainnit sekä kiihtyvyyden maksimiarvot kohteittain. (Fitzpatrick ym. 2000)

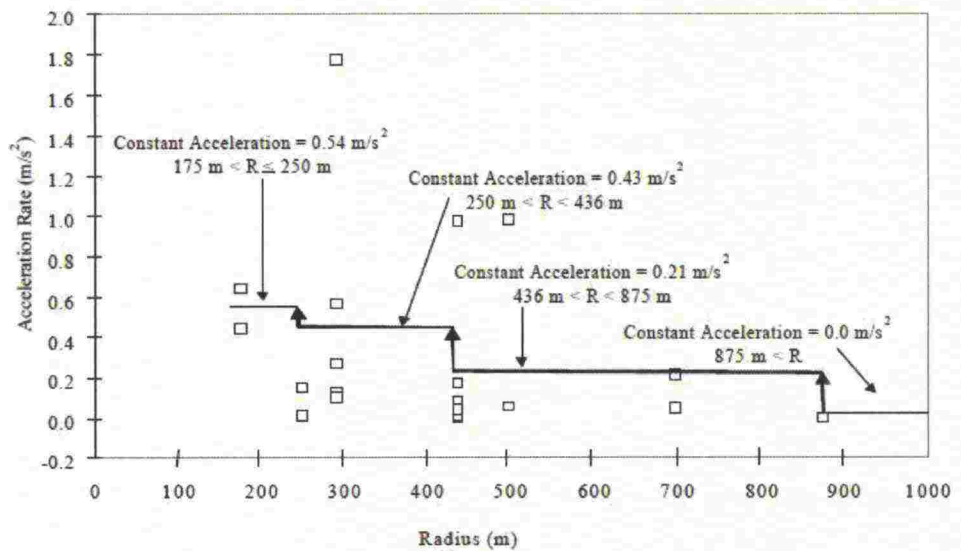
Site No. (Radius [m])	PC- 50	PC	QP	MP	3QP	PT	PT+ 50	PT+ 100	PT+ 150	PT+ 200	Max Acc. Rate (m/s <sup>2</sup> )
PA1 (437)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.00
PA2 (437)		min			max						0.17
PA3 (873)		min		max							0.00
PA4 (873)					min	max					0.00
PA5 (250)			min	max							0.01
PA6 (291)			min				max				0.12
PA7 (437)					min	max					0.08
PA8 (437)		min		max							0.97
PA9 (437)						min	max				0.00
PA10 (291)						min		max			0.10
PA11 (699)					min			max			0.21
PA12 (699)								min	max		0.05
TX13 (291)					min				max		0.57
TX14 (437)					min				max		0.04
TX15 (250)						min			max		0.15
TX16 (291)					min			max			1.77
TX17 (499)						min	max				0.05
TX18 (499)					min	max					0.98
TX19 (291)			min					max			0.27
TX20 (175)				min				max			0.44
TX21 (175)				min					max		0.64
Totals—Max				3	1	3	3	5	5		20
Totals—Min		3	3	2	7	4		1			20

Näiden taulukoiden vertailun perusteella skenaario 3, jossa määritettiin kiihtyvyyden ja hidastuvuuden maksimiarvot, osoittautui sopivimmaksi analyysimenetelmäksi. Kuten taulukoista 9 ja 10 nähdään, kuljettajan ajoitus kiihdyttämisen ja hidastamisen aloittamiseen vaihtelee kohteittain. Nopeuden minimi- ja maksimiarvot eivät sijoitu samaan kohtaan eri kohteissa, joten vain tietyn ennalta valitun alueen tietoihin perustuen ei ole mahdollista määrittää todellisia kiihtyvyyden ja hidastuvuuden arvoja eikä kaarteiden koko vaikutusta kaarrenopeuksiin.

Kuvassa 16 on esitetty Fitzpatrickin ym. kaarreajon hidastuvuusmalli ja kuvassa 17 kiihtyvyyksmalli.



Kuva 16. Hidastuvuusmalli (Fitzpatrick ym. 2000).

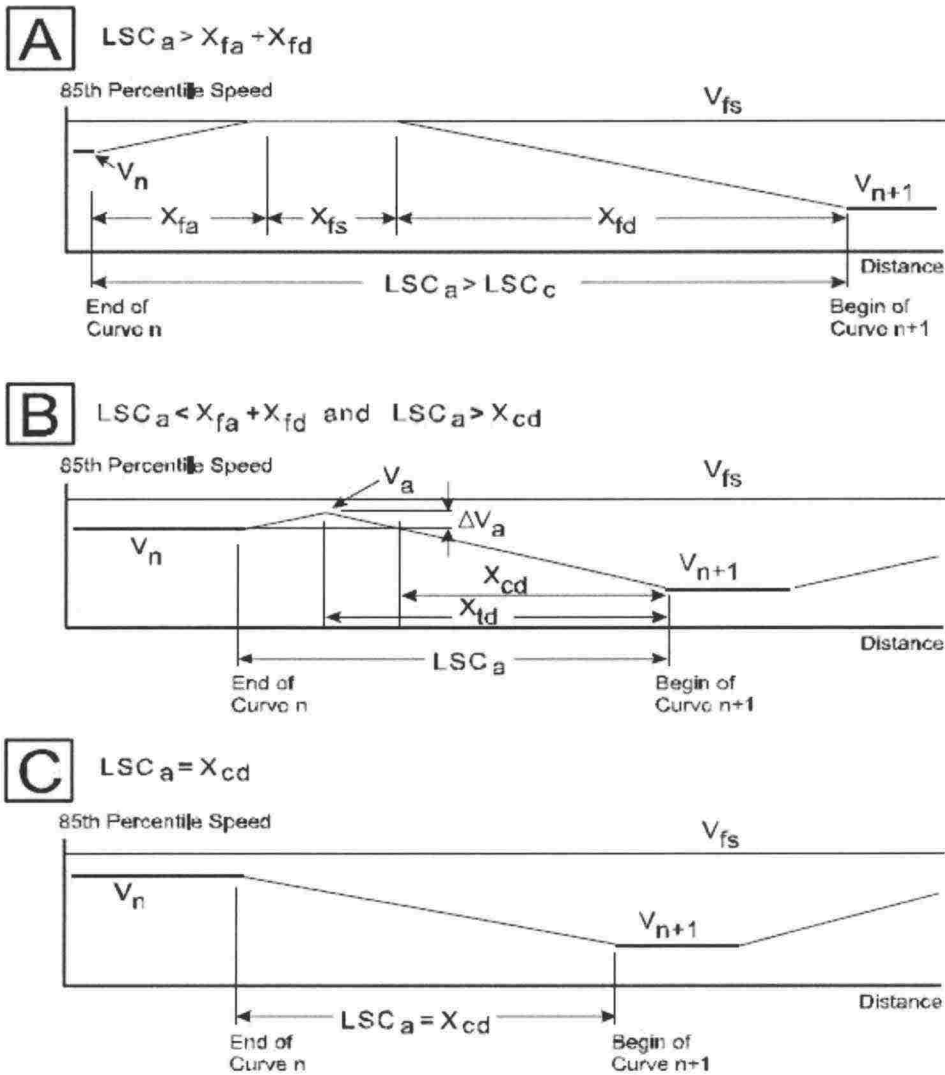


Kuva 17. Kiihtyvyyssmalli (Fitzpatrick ym. 2000).

Kuvissa 18 ja 19 on esitetty yhteensä kuusi erilaista kiihdytyksien ja hidastusten toimintamallia kaarteiden välisille suoraosuuksille. Kuvissa käytetyt merkinnät on selitetty liitteessä 2.

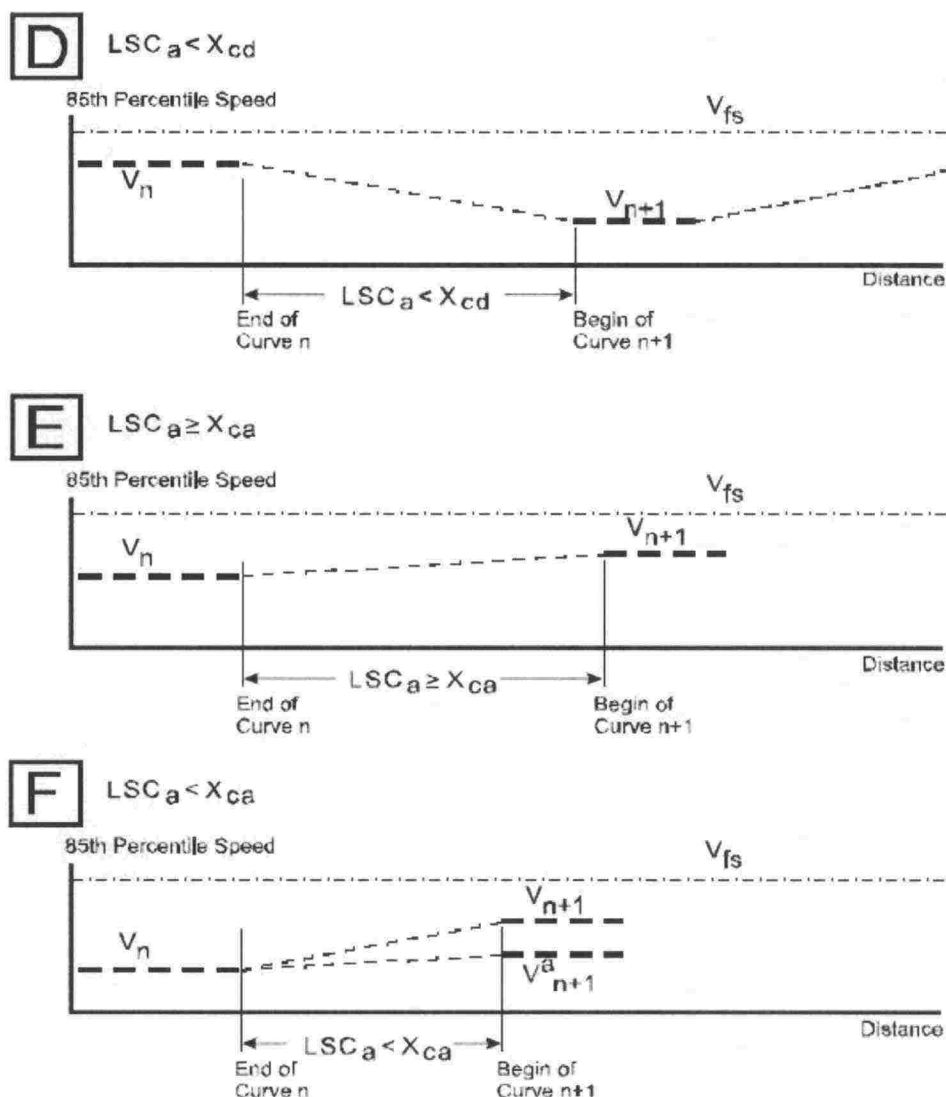


## Acceleration/Deceleration Conditions



Kuva 18. Jarrutus- ja kiihdytysolosuhteet erilaisissa tilanteissa (Fitzpatrick ym. 2000). (Katso liite 2 muuttujien määrittelyistä)

## Acceleration/Deceleration Conditions

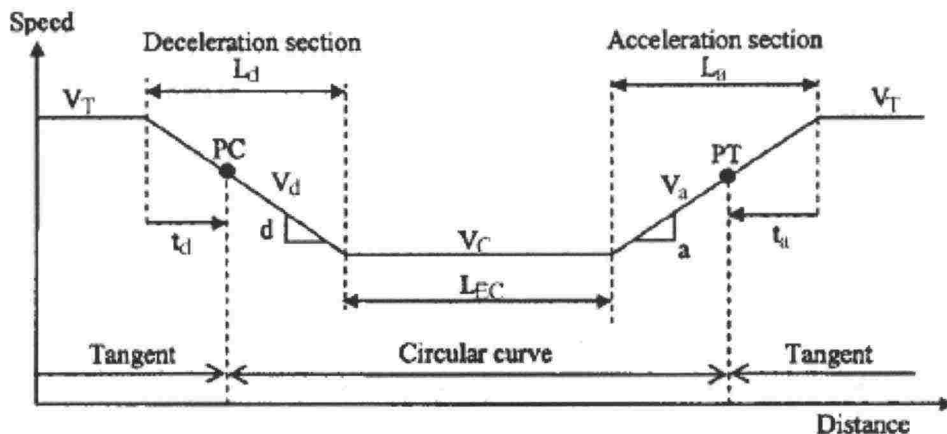


Kuva 19. Jarrutus- ja kiihdytysolosuhteet erilaisissa tilanteissa (Fitzpatrick ym. 2000). (Katso liite 2 muuttujien määrittelyistä)

Voidaan todeta, että jyrkkä kaarre johtaa suurempiin nopeusmuutoksiin ja samalla suurempien hidastuvuuksien ja kiihtyvyyksien käyttöön. Tämä voi johtaa ongelmiin ajodynamiikan ja liikenneturvallisuuden suhteen.

Hu ja Donnell (2007) määrittivät jarrutuksen ja kiihdytyksen tapahtumiskoh-  
taa ja voimakkuutta 2-kaistaisilla maanteilla yöaikaan. Vastaavaa yöaikaan  
suoritettua tutkimusta ei ole aiemmin tehty. Katsauksessa aiempaan aihetta  
käsittelevään tutkimuskirjallisuuteen he esittivät Figueroan ja Tarkon (2005)  
tutkimuksen tulokset, jotka perustuivat seuraaviin olettamuksiin (kuva 20):

- kuljettajat ajavat kaarretta edeltävällä suoralla suoran ominaisuuksiin perustuvaa tavoitenopeutta ( $V_T$ )
- kuljettajat alkavat alentaa ajonopeuttaan vakiohidastuvuudella ( $d$ ) ennen kaarteiden alkua ja jatkavat hidastusta vielä karteiden alueella
- kuljettajat ajavat osan kaarteesta sen ominaisuuksiin perustuvaa tavoitenopeutta  $V_C$
- kuljettajat alkavat kiihdyttää vauhtiaan vakio kiihtyvyydellä ( $a$ ) ennen kaarteiden loppumista ja jatkavat kiihdyttämistä kunnes saavuttavat kaarteiden jälkeisen suoran tavoitenopeuden ( $V_T$ ).



Kuva 20. Nopeuden muutos kaarretta lähestyttäessä, kaarteessa ja sen jälkeen. (Figuerola ja Tarko 2005)

Tuloksena oli, että 65,5 % hidastamisesta ja 71,6 % kiihdyttämisestä tapahtui suorilla ja loput kaarteiden alueella. Keskihidastuvuus oli  $0,73 \text{ m/s}^2$  ja keskikihtyvyys oli  $0,49 \text{ m/s}^2$ .

Muiden katsauksessa läpikäytyjen tutkimusten mukaiset hidastuvuudet ja kiihtyvyydet olivat välillä  $-1,0 \text{ m/s}^2 - +1,0 \text{ m/s}^2$ .

Hu ja Donnell käsittelivät tutkimuksessaan monimutkaisempia linjauksia kuin aiemmat tutkimukset. Lisäksi tutkimus tehtiin aiemmista tutkimuksista poiketen yöaikaan. Nämä asiat yhdessä saattavat selittää heidän tutkimustuloksensa suurempaa vaihtelua verrattuna aiempiin tutkimuksiin. Heidän hidastuvuus- ja kiihtyvyyshavaintonsa sijoittuivat välille  $-1,46 \text{ m/s}^2 - +1,49 \text{ m/s}^2$ .

He esittivät myös seuraavia asioita mietittäväksi tiegeometriaa suunniteltaessa:

- mutkaisilla 2-kaistaisilla maanteilla pitkät alamäessä olevat kaarteet lisäävät kiihdyttämistä kaarteesta poistuttaessa
- suuret erot peräkkäisten kaarteiden pituudessa johtavat suurempiin hidastuvuuksiin kaarteita lähestyttäessä
- pienisäteiset kaarteet johtavat suurempiin kiihtyvyyksiin kaarteista poistuttaessa
- pienisäteiset kaarteet johtavat suurempiin hidastuvuuksiin kaarteita lähestyttäessä
- suuret erot peräkkäisten kaarteiden säteessä johtavat suurempiin hidastuvuuksiin kaarteita lähestyttäessä



## 5.2.2 Vaikutus kuljettajan kuormittumiseen

McDonald ja Ellis (1975) tutkivat kuljettajan kuormittumista erilaisissa kaarteissa (17,33, 10,70, 4,60 ja 0 astetta, eli kaarresäteillä 101 m, 163 m ja 380 m sekä suora) ja eri nopeuksilla (32, 64, 96 ja 129 km/h). Tutkimuksessa määritettiin prosenttiosuus kuljettajan huomiosta (katseen kohdistumisajasta eri kohteisiin), joka tarvittiin tienlinjan havainnointiin erilaisissa kaarteissa eri nopeuksilla. Myös ajoneuvon sijaintia ajoradalla tarkkailtiin. 17 asteen kaarteissa nopeudella 32 km/h kuljettajan huomiosta tielinjan havainnointiin tarvittiin 26 % ja nopeudella 64 km/h 42 %. Suoralla tieosuudella huomiontitarve oli noin 23 % nopeudella 64 km/h ja säilyi samana nopeutta kasvatettaessa aina suurimpaan mitattuun nopeuteen 129 km/h asti. Keskimääräiset ajoneuvon sijainnit ajoradalla keskiviivasta mitattuina olivat 13 cm suoralla tieosuudella, 18 cm vasemmalle kääntyvissä kaarteissa ja 15 cm oikealle kääntyvissä kaarteissa. Tutkimustulokset osoittivat kuljettajien ohjaamiseen liittyvän huomiontarpeen kasvavan kaarteiden jyrkkyyden kasvaessa. Fitzpatrick ym. (2000) päätyivät tutkimuksessaan samansuuntaiseen tulokseen, jonka mukaan kuljettajan kuormittuminen kasvaa lineaarisesti kaarresäteiden käänteisluvun kanssa.

He tutkivat visuaalista kuormittumista (visual demand) myös ajosimulaattorissa. Tutkimuksen perusteella kuormittuminen oli keskimäärin suurempaa jyrkemmissä kaarteissa. Visuaalista kuormittumista kuvattiin katseen kohdistumisen perusteella seuraavasta kaavasta (6) saadulla arvolla:

$$VD_i = \frac{t_{glance\_length}}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

missä,

$VD_i$	= visuaalinen kuormittuminen aikavälillä $t_1$ - $t_2$
$t_1$	= kellon lukema edellisellä pyyntökerralla (s)
$t_2$	= kellon lukema tämänhetkiselä pyyntökerralla (s)
$t_{glance\_length}$	= aika, jona kuljettajalla oli näkyvyys tiehen (s), kiinteä 0.5 s

Suoralla tieosuudella kuormittuminen oli 0,34 ja kaarteissa 0,54 ( $R=582$  m) ja 0,61 ( $R=146$  m). Kääntökulmalla ei tutkimuksen mukaan ollut suurta vaikutusta visuaaliseen kuormittumiseen. Keskimääräinen visuaalinen kuormittuminen oli kääntökulmaltaan 25-, 45- ja 90-asteisissa kaarteissa 0,53, 0,54 ja 0,52 vastaavasti. Kaarteiden alussa ei ollut eroa kuormittumisessa lyhyiden ja pitkien saman säteisten kaarteiden välillä. Kuljettajilta kysyttäessä he kuitenkin vastasivat pidempien kaarteiden olleen lyhyitä kuormittavampia, vaikka mitattu kuormittuminen riippui enemmän kaarteiden jyrkkyydestä. Keskimääräinen visuaalinen kuormittuminen ei siis kasva kaarteiden pidetessä, mutta kuormittumisen kesto pitenee. Visuaalisen kuormittumisen kasvu oli tutkimuksen mukaan suurimmillaan noin 90 metriä ennen kaarteiden alkua ja kuormittumisen maksimiarvo 100 metrin matkalla kaarteiden alkupisteestä mitattuna.

Suurta eroa ei ollut siinä kummalle puolelle tietä kuljettajat katsovat kaarteissa. Keskimäärin he katsoivat loivemmissä kaarteissa sisäkaarteiden puolelle ja jyrkemmissä ulkokaarteiden puolelle. Tämä ilmiö oli huomattavampi vasemmalle kääntyvissä kaarteissa.

Simulaattorissa ja testiradalla saadut tulokset olivat yleisesti ottaen samantyyppisiä.

### 5.2.3 Vaikutukset onnettomuuksiin

Andersson ja Krammes (2000) löysivät luvussa 5.1.3 mainitun tutkimuksen (Ottesen ja Krammes 2000) mallia apuna käyttäen tilastollisesti merkittävän yhteyden kaarteissa tapahtuneiden onnettomuuksien ja kaarteiden jyrkkyyden sekä kaarteissa tapahtuneen nopeuden hidastumisen välille. Kaarteissa, joissa ajonopeuden hidastuminen (km/h) on suuri, on myös onnettomuusaste (onnettomuutta/miljoona ajoneuvokilometriä) korkea. Keskimääräinen onnettomuusaste kasvaa melkein lineaarisesti keskimääräisen ajonopeuden muutoksen (suoralla vs. kaarteissa) kanssa.

Haynes, Lake, Kingham, Sabel, Pearce ja Barnett (2007) tutkivat tien kaarteisuuden vaikutusta kuolemaan johtaneissa onnettomuuksissa Uudessa-Seelannissa. Mitään todisteita sille, että mutkaisemmilla teillä olisi tapahtunut enemmän onnettomuuksia kuin vähemmän kaarteisilla ei löytynyt. Tämä tukee tietyllä varauksella ajatusta, että tasaisin välein sijoitetut kaarteet saattavat parantaa turvallisuutta muun muassa pitämällä nopeudet jatkuvasti alemmalla tasolla.

Useat tutkimukset kuitenkin osoittavat, että tielinjan kaarreosuuksilla tapahtuu huomattavasti enemmän onnettomuuksia kuin suorilla tieosuuksilla. Onnettomuuksien määrä vaihtelee kaarteissa 1,5-kertaisesta jopa nelinkertaiseen verrattuna suoraan tieosuuteen. (Glennon, Neuman ja Leisch 1985; Zegree Stewart, Reinfurt, Council, Neuman, Hamilton, Miller and Hunter, 1990)

Useiden tutkimusten mukaan onnettomuuksien syyt liittyvät olosuhteisiin sopimattomiin ajokäyttäytymisiin kaarteissa. Näitä ovat

- Kyvyttömyys selviytyä kaarteesta, etenkin sellaisista joiden säde  $R < 580$  m (Eckhardt ja Flanagan 1956)
- Mitoitusnopeuden ylittäminen (Messer ym. 1981)
- Suunnitellulta ajolinjalta poikkeaminen (Glennon ja Weaver 1971; Good 1978)
- Kykenemättömyys säilyttää oikea sivuttaissijainti (McDonald ja Ellis 1975)
- Virheellinen ennakointi kaarretta lähestyttäessä (Messer ym. 1981; Johnston 1982)
- Turvallisuusriskin aliarviointi (Johnston 1982).

Monissa tutkimuksissa on myös selvitetty kaarregeometrian arvoja, joiden alittaminen johtaa usein kasvaneisiin onnettomuusmääriin:

- kaarresäde on alle 400 m (McLean 1981; Choueiri ja Lamm 1987; Baldwin 1946; Balogh 1967; Vasilev 1963; Babkov 1975; Silyanov, 1973; Krebs ja Kloeckner 1977)
- kaarresäde on alle 200 m (Elvik & al 2004)
- 2-kaistaisen maantien kaarresäde on alle 600 m (Choueiri ja Lamm 1987; Johnston, 1982)
- kaarresäde on alle 580 m (Cirillo ja Council 1986).



Gupta ja Jain (1973) tutkivat, mitkä tielinjan elementit 2-kaistaisilla maanteillä korreloivat tilastollisesti onnettomuuksien kanssa. Analyysin neljästä geometrisestä muuttujasta (kaarteisuus, tien leveys, vapaa korkeus ja näkemä) kaarteisuus korreloi eniten kaikkien onnettomuustyyppien kanssa 2-kaistaisilla maanteillä. Kaarteisuus liittyi myös merkittävästi kaikkiin liittymien ulkopuolella tapahtuneisiin onnettomuuksiin lukuun ottamatta kuolemaan johtaneita onnettomuuksia.

Haywoodin (1980) kirjallisuusselvityksessä tietutkijoiden keskuudessa vallitsee yhteisymmärrys siitä, että kaarteiden jyrkkyys lisää onnettomuuksien määrää. Vaaratilanteita aiheuttavat yksittäiset jyrkät kaarteet tieosuuksilla, joiden yleisgeometria koostuu pitkistä suorista ja loivista kaarteista. Lisäksi Haywoodin mainitsi, että jyrkät kaarteet epätasaisin välein ovat paljon vaarallisempia kuin samantasoiset jyrkät kaarteet tasaisin välein, ja että 2-kaistaisilla maanteillä geometrisistä ominaisuuksista kaarteisuus saattaa korreloida eniten onnettomuuksien kanssa.

Choueiri ja Lamm (1987) tekivät kirjallisuuskatsauksen, johon kuului amerikkalaisten tutkimusten lisäksi kansainvälisiä raportteja kaarresäteen vaikutuksesta ajokäyttäytymiseen (onnettomuudet ja nopeudet). Katsaus sisälsi tutkimuksia Yhdysvalloista, Saksasta, entisestä Neuvostoliitosta ja Ruotsista. Tutkimus osoitti, että kaarresäteen kasvaminen vähentää onnettomuuksia. Tämä vaikutus on kuitenkin suhteellisen pieni kaarresäteen kasvaessa yli 400 - 500 metriin (kuva 21). Elvik ym. (2008) totesivat, että loivat kaarteet ( $R = 1000 - 2000$  m) voivat olla jopa hieman turvallisempia kuin aivan suora tie.

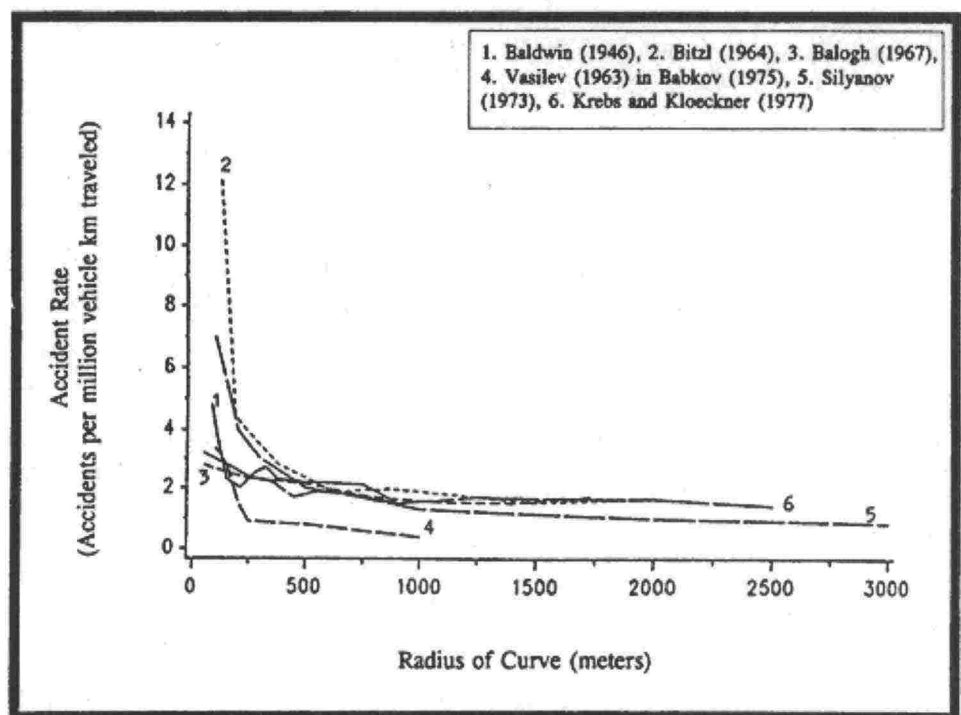


Figure 1. Related studies illustrating the relationship between accident rate and radius of curvature.

Kuva 21. Kaarresäteen ja onnettomuusasteen riippuvaisuus (Elvik ym. 2008)



Myös Cirillo ja Council (1986) päätyivät tutkimuksessaan samankaltaiseen päätelmään, jonka mukaan kaarresäteen tulisi olla yli 580 metriä ja pituuskaltevuuden alle 6 prosenttia.

Messer ym. (1981) tekivät kenttätutkimuksen testiradalla käyttäen erilaisia kaarteita. Tarkoituksena oli selvittää kuljettajan ajokäyttäytymistä kaarteissa. Testiradalla oli sekä vakiosäteisiä (4-25 astetta /  $R = 435-70$  m) että vaihtuväsäteisiä (4, 6, 9 ja 12 astetta /  $R = 435, 290, 195$  ja  $145$  m) kaarteita. Yksi aste kaarresäteen (kaarteisuuden) mittarina tarkoittaa tässä samaa kuin kaarresäde, joka aiheuttaa yhden asteen muutoksen ajosuunnassa 30 metrin (100 jalan) matkalla. Havaintoja kerättiin sivuttaiskiihtyvyydestä, ajoneuvon nopeudesta ja jarrutuskäyttäytymisestä. Tuloksista ilmeni seuraavaa:

- Yli 5 asteen muutos kaarteiden jyrkkyydessä aiheutti merkittävän kasvun kuljettajan kokemassa yllätyksessä.
- Kaarteissa jarruttaneiden kuljettajien osuus kasvoi erittäin nopeasti heti 4 astetta ( $R = 435$  m) jyrkemmissä kaarteissa
- Ajoneuvojen keskinopeudet kaarteissa olivat käytännössä katsoen samoja, joita AASHTO käyttää mitoitusnopeutena, joten todellisuudessa puolet kuljettajista luultavasti ylittää mitoitusnopeuden kaarteissa.

Johnston (1982) keskittyi kirjallisuusselvityksessään yrityksiin muokata kuljettajien käyttäytymistä maanteilla. Hän esitti, että onnettomuustilastoissa voimakkaasti edustettuina olivat 2-kaistaisten maanteiden kaarteet, joiden säde on alle 600 m, ja kaarteet, jotka vaativat merkittävää hidastamista kaarretta edeltävällä pitkällä suoralla kasvaneen nopeuden takia. Hän painotti, kuinka tärkeää on kaarteiden esiintymisen tasaisuus eli se, että kuljettaja osaa odottaa kaarretta. Tämä korostaa tarvetta katsoa pelkkiä onnettomuustilastoja syvemmälle selvitettäessä kuljettajan käyttäytymistä ja onnettomuuksien syitä maanteiden kaarteissa. Kaarteiden läpi ajaminen onnistuneesti ja turvallisesti on riippuvainen lähestymisnopeudesta ja oikeasta sijainnista ajoradalla läpi koko kaarteiden. Johnstonin mielestä tutkimuksissa, joissa käsitellään nopeudensäätelystä, tulisi ottaa huomioon seuraavat asiat:

- ajoneuvon nopeus ennen kuin kuljettaja havaitsee kaarteiden
- nopeus lähestyttäessä kaarretta
- nopeusprofiili koko kaarteiden matkalta.

Hän ilmoitti myös, että useat tutkimukset ovat osoittaneet onnettomuuksien, joissa kuljettaja on menettänyt ajoneuvonsa hallinnan, johtuneen kuljettajan kyvyttömyydestä säilyttää sivuttaissijainti kaarteissa. Tämä on seurausta liian suuresta nopeudesta ja vääränlaisesta jarrutuskäyttäytymisestä kaarretta lähestyttäessä, mikä taas johtuu virheellisestä ennakkoinnista sekä kaarteiden vaatimusten aliarvioinnista. Näin ollen, jos kuljettajan ajokäyttäytymistä halutaan muuttaa, on ensisijaisesti keskityttävä nopeuteen kaarretta lähestyttäessä ja juuri ennen kaarteeseen ajoa. Nopeuskäyttäytyminen kaarteissa tulee tärkeysjärjestyksessä vasta näiden jälkeen.

Choueiri ja Lamm (1987) selvittivät yksittäisten mitoitusparametrien (kaarresäde, kaarteiden pituus, sivukaltevuus, pituuskaltevuus, näkemä, kaistan leveys, pientareen leveys ja nopeusrajoitukset) ja liikennemäärän vaikutusta nopeuksiin ja onnettomuuksiin yli 250:lla 2-kaistaisella maantiellä New Yorkin osavaltiossa. Näitä yhteyksiä tutkittiin regressioanalyysin avulla. Tutki-

mus osoitti, että onnettomuusaste kasvoi kaarresäteen kasvaessa riippumatta siitä, oliko kaarteita merkitty varoitusmerkinnöin ja -merkein. He suosittelivat, että kaikki kaarteet, joiden säde  $R < 175\text{m}$  ja kaarteet, joiden takia ajonopeus muuttuu yli  $19\text{ km/h}$ , tulisi suunnitella uudelleen.

Sveitsissä on myös tällä vuosituhannella tutkittu geometrian vaikutusta liikenteen sujuvuuteen ja turvallisuuteen. Leeman (2007) toteaa, että kaarteisuus ei ole ongelma, jos tielinja ei sisällä yllättäviä yksittäisiä kaarteita, jolloin autoilijat kykenevät sopeuttamaan ajonopeuden tilanteen mukaiseksi. Pitkän suoran jälkeinen kaarre on kuljettajalle haastavampi kuin tieosuus, jolla samanlaisia kaarteita esiintyy säännöllisesti. Spacekin (2004) mukaan Sveitsin käytäntö, jossa mitoitusnopeuden mukaisesti valitut maksimi-, minimi- ja keskimääräiset mitoituselementit muodostivat ajokäyttäytymistä ohjaavan selkeän kokonaisuuden, ei toimi enää yhtä hyvin kuin aikaisemmin. Kun maaseututeiden yleinen nopeusrajoitus laskettiin  $100\text{ km/h}$ :stä  $80\text{ km/h}$ :iin, nopeuden säätely uusilla  $80\text{ km/h}$  -teillä tiegeometrian keinoin johtaa niin pieniin kaarresäteisiin, että turvallisuushyöty ei enää ole varma.

### 5.3 Tasaus

Pystygeometrian vaikutuksia ajokäyttäytymiseen ei ole tutkittu yhtä paljon kuin vaakageometrian. Tutkimukset koskevat pääosin näkemän vaikutusta onnettomuuksiin. Tasaus muodostuu suorista ja pyöristyskaarista. Mitoituksen perusteena on käytetty riittävän pysähtymisnäkemän tarjoamista kuljettajalle kaikissa tilanteissa.

Tutkimukset ovat osoittaneet, että rajalliset näkemäolosuhteet lisäävät merkittävästi onnettomuuksia. Etenkin peräänajot ovat yleisiä mäkisillä tieosuuksilla, joissa näkemäolosuhteet ovat huonot (Mullins ja Keese 1961). Yksittäiset jyrkät mäet lisäävät onnettomuusriskiä (Elvik ym. 2008).

Kostyniuk ja Cleveland (1986) analysoivat 10 pienisäteisen pyöristyskaaren (pysähtymisnäkemä  $36\text{--}94\text{ m}$ ) ja 10 suurisäteisen pyöristyskaaren (pysähtymisnäkemä yli  $213\text{ m}$ ) onnettomuustilastoja 2-kaistaisilla maanteillä. Pienisäteisissä pyöristyskaarissa oli tapahtunut  $60\%$  enemmän onnettomuuksia kuin suurisäteisissä.

Lefevre (1953) huomasi tutkimuksessaan, että kuljettajien lähestyessä pyöristyskaaria, joiden alueella on lyhyt näkemä, he poikkeuksetta hiljentävät nopeuttaan. Tämä nopeuden vähennys ei kuitenkaan ole lähellekään riittävä turvallisen ajosuorituksen varmistamiseksi. Kuljettajat osoittautuivat olevan tietämättömiä kuperan pyöristyskaaren mahdollisista vaaroista. Nopeus pyöristyskaaren päällä ei ollut riippuvainen näkemän pituudesta, vaan nopeus valittiin tieosuudella vallitsevan nopeusrajoituksen perusteella.

Farber (1982) teki herkkyystarkasteluja kuljettajan silmäkorkeuden, kohteen korkeuden, kitkan, nopeuden ja reaktioajan välisestä suhteesta pysähtymisnäkemään kuperien pyöristyskaarien kohdalla. Kuljettajan silmän korkeuden ja pysähtymisnäkemän välillä oli suhteellisen pieni vuorovaikutus, mutta nopeudella, kitkalla ja reaktioajalla sitä vastoin oli havaittavissa suuri yhteys pysähtymisnäkemän kanssa. Nopeuteen vaikuttamalla voitaisiin siis parantaa turvallisuutta merkittävästi pyöristyskaarien kohdalla.



Riittävä pysähtymisnäkemä, johon ajonopeuden vähentämisellä voidaan merkittävästi vaikuttaa, näyttäisi tutkimusten perusteella olevan merkittävin tekijä tasauksen turvallisuudessa. Elvik ym. (2008) raportoivat, että joidenkin tutkimusten mukaan näkemän kasvaessa selvästi yli pysähtymisnäkemän siitä aiheutuva nopeuksien kasvu ja ohitusten lisääntyminen jopa huonontavat kokonaisturvallisuustasoa.

Ohitusnäkemä on tärkeä tekijä liikenteen sujuvuuden kannalta. Suunnittelussa pyritään järjestämään riittävän tiheästi riittävän pitkiä osuuksia, joilla ohittaminen on mahdollista. Sekä kuperat pyöristyskaaret että näkemäesteet kaarteiden kohdilla rajoittavat näkemiä. Harwood ym. (2008) päätyivät siihen, että USA:n ohjeiden mukaiset lyhimmät tiemerkinnoin osoitetut ohituksen sallivat osuudet ovat riittäviä turvallisen ohituksen tekemiseen lentävällä lähdöllä, mutta näillä osuuksilla tapahtuvista ohituksista valtaosa jatkuu ohituksen kieltävän tiemerkinnoin alueelle. Tästä huolimatta tällaiset hyvin lyhyet osuudet, joilla ohittaminen on sallittu, eivät näy onnettomuustilastoissa. Vuonna 2005 tehdyt kenttätutkimukset käsittivät tarkasteluosuuksien liikennetapahtumien videokuvaamisen, liikennelaskennat ja tulosten analysoinnin. Niiden perusteella todettiin, että 1930- ja 1940-luvuilla tehtyjen ja 1970-luvulla päivitettyjen suunnittelu- ja tiemerkinnohjeiden mukaan toteutetut järjestelyt ovat nykyisille ajotavoille ja ajoneuvokannalle varman päälle mitoitettuja (taulukko 11).

*Taulukko 11. Lyhimmät tiemerkinnoin merkittävät ohituksen sallivat osuudet USA:ssa Harwood ym. (2008) mukaan.*

Suunnittelunopeus (km/h)	Minimiohitusjakso (m)
30	120
40	140
50	160
60	180
70	210
80	245
90	280
100	320
110	355
120	395
130	440

## 5.4 Poikkileikkaus

### 5.4.1 Vaikutukset liikenneturvallisuuteen

Tutkimukset ovat yleisesti osoittaneet, että päällysteen leveydellä on merkittävä vaikutus ajonopeuden valintaan ja liikenneturvallisuuteen. Tielinjaan sopimaton päällysteen leveys voi vakavasti heikentää tien liikenneturvallisuutta. Choueiri ja Lamm (1987) raportoivat useiden aikaisempien tutkimuksien tuloksia, joiden mukaan päällysteen leveydellä on selkeä vaikutus onnettomuusasteeseen. Tutkimuksista kävi ilmi, että onnettomuudet olivat vähentyneet päällysteen leveyden kasvaessa.



Nilsson (1975) esitti raportissaan, että suorilla tieosuuksilla pituuskaltevuuden ollessa alle 1,5 %, onnettomuudet vähenivät puoleen, kun päällysteen leveys kasvoi 6,1 metristä 13,1 metriin. Myös Kunze (1976) löysi yhteyden pienenevien onnettomuusmäärien ja päällysteen leventämisen välillä. Tämä yhteys koski kaikkia onnettomuustyppejä (suistumiset, peräänajot, nokkakolarit ja risteysonnettomuudet).

Krebs ja Kloeckner (1977) raportoivat, että jokainen 1 metrin lisäys päällysteen leveyteen vähentää onnettomuuksien määrää 0,25:lla jokaista miljoonaa ajoneuvokilometriä kohden.

Zegree, Hummer, Herf, Reinfurt ja Hunter (1987) osoittivat, että kaksikaistaisilla maanteilla levennettäessä ajokaistaa 0,3 metrillä voidaan odottaa onnettomuuksien (suistumiset, nokkakolarit ja peräänajot) vähentyvän 12 prosentilla.

Kuvassa 22 on esitetty eri tutkijoiden saamia tuloksia päällysteen leveyden vaikutuksesta onnettomuuksiin. Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin syytä ottaa huomioon, että esimerkiksi kapeammalla kaistalla ajetaan hiljempaa kuin leveämmällä kaistalla riippumatta päällysteen leveydestä. Päällysteen leveyden lisäksi monet muut tekijät vaikuttavat turvallisuuteen, joten päällysteen leveyden vaikutuksen erottaminen yksiselitteisesti näistä kaikista tekijöistä on hankalaa.

Zegeer, Stewart, Reinfurt, Council, Neuman, Hamilton, Miller ja Hunter (1990) selvittivät tutkimuksessaan niitä kaarteiden ominaisuuksia, jotka vaikuttavat onnettomuuksiin 2-kaistaisilla maanteilla. Samalla he pyrkivät määrittämään minkälaisia geometrisia muutoksia tulisi tehdä, jotta turvallisuutta kaarteissa voitaisiin parantaa. Heidän tutkimuksena sisälsi sekä 104 kuolemaan johtanutta onnettomuutta että 104 onnettomuutta, jotka eivät johtaneet kuolemaan. Kaikki onnettomuudet olivat kaarteissa tapahtuneita ja näiden perusteella selvisi, että 77 %:ssa kuolemaan johtaneista onnettomuuksista ensimmäinen ohjausliike, joka johti auton hallinnan menettämiseen, oli tapahtunut kaarteiden ulkoreunaa kohti. Vastaava luku oli 64 % niissä onnettomuuksissa, jotka eivät johtaneet kuolemaan. Noin 28 %:ssa kuolemaan johtaneista (8,8 %:ssa ei-kuolemaan-johtaneista) onnettomuuksista ajoneuvo oli ensin suistunut oikealle, jonka jälkeen palannut takaisin ajoradalle ja aiheuttanut törmäyksen. Lisäksi he tutkivat 10 900 kaarretta Washingtonin osavaltiossa ja vertasivat niissä sattuneita onnettomuuksia suorilla tapahtuneisiin onnettomuuksiin. He tulivat siihen tulokseen, että tien leveyden ollessa sama (kaistat+pientareet) vakavaan loukkaantumiseen ja kuolemaan johtavia onnettomuuksia tapahtuu enemmän kaarteissa kuin suorilla tieosuuksilla. Tulosten tarkemman tarkastelun perusteella he arvioivat kaistojen sekä pientareiden (päällystetyt ja päällystämättömät) leveyden vaikutusta onnettomuuksiin. Kaistojen tai pientareiden leventäminen kaarteissa voi vähentää onnettomuuksia jopa 33 %. Arviot erilaisten levennysten vaikutuksista onnettomuuksien vähenemisessä on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Kaistan (2,44 m/8 ft) leventämisen vaikutus onnettomuuksiin.  
(Zegeer, Stewart, Reinfurt, Council, Neuman, Hamilton, Miller  
ja Hunter, 1990)

Kaistan tai pientareen levennys (m), suluissa (ft)		Onnettomuuksien väheneminen (%)		
Yhteensä	Yhdellä puolella	Kaistan levennys	Päällystetyn pientareen levennys	Päällystämättömän pientareen levennys
0,61 (2)	0,3 (1)	5	4	3
1,22 (4)	0,61 (2)	12	8	7
1,83 (6)	0,91 (3)	17	12	10
2,44 (8)	1,22 (4)	21	15	13
3,05 (10)	1,52 (5)	-	19	16
3,66 (12)	1,83 (6)	-	21	18
4,27 (14)	2,13 (7)	-	25	21
4,88 (16)	2,44 (8)	-	28	24
5,49 (18)	2,74 (9)	-	31	26
6,10 (20)	3,05 (10)	-	33	29

Elvik ym. (2008) ovat koonneet yhteen suuren määrän tien leveyden ja liikenneturvallisuuden välistä yhteyttä koskevia tutkimustuloksia (kuva 22). Nopeustaso on yksi merkittävä tekijä tässä yhteydessä. Leveämpi tie on varsinkin taajamien ulkopuolella ja kaarteissa turvallisempi, mutta ajoradan leveyttä enemmän tähän vaikuttaa pientareen riittävä leveys. Lundkvist (1994) vahvistaa tämän kevyen liikenteen osalta, lisäksi pyöräilijät ja kävelijät arvostavat leveän pientareen korkealle. Monien Elvikin referoimien tutkimusten mukaan ajoradan leventäminen kuitenkin kasvattaa nopeuksia (ja sitä kautta onnettomuusriskiä) enemmän kuin mitä ajotehtävän helpottumisella parannetaan turvallisuutta, varsinkin liittymissä.



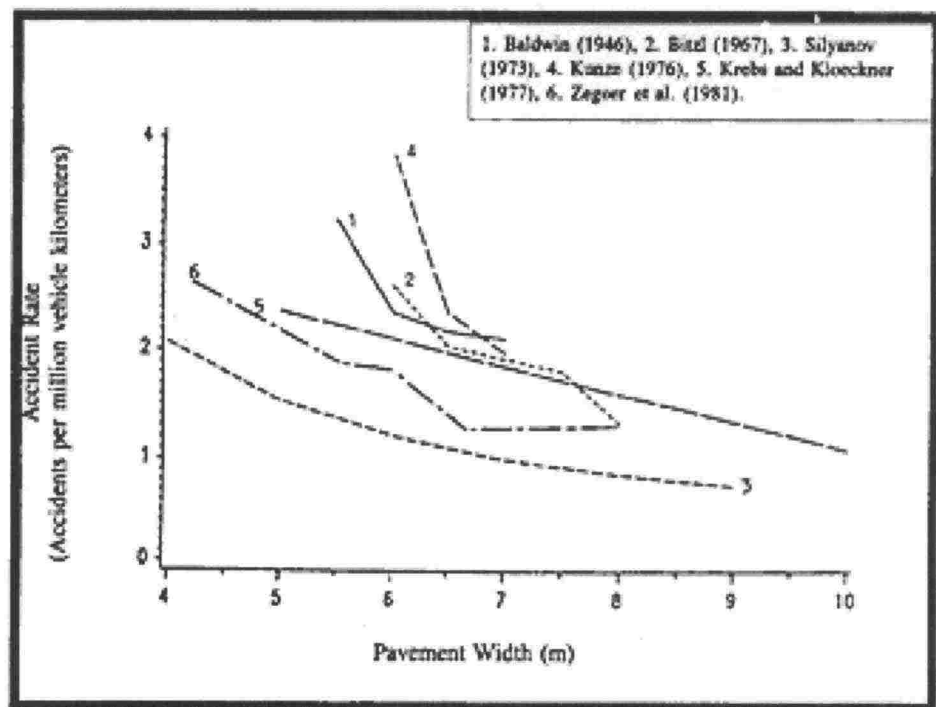


Figure 7. Related studies illustrating the relationship between accident rate and pavement width.

Kuva 22. Päälysteen leveyden ja onnettomuusasteen välisiä yhteyksiä eri tutkimusten mukaan. (Elvik ym. 2008)

#### 5.4.2 Vaikutukset nopeuksiin ja ajolinjaan

Lewis-Evans ja Charlton (2005) tutkivat ajosimulaattorin avulla tien leveyden vaikutusta kuljettajan käyttäytymiseen ja erityisesti siihen mitkä prosessit vaikuttavat kuljettajan käyttäytymiseen. Testihenkilöiden ajamat kolme tielinjaa olivat 25 kilometriä pitkiä, joista keskimmäiset 20 kilometriä erosivat toisistaan tien poikkileikkauksen suhteen. Tulokset osoittivat tien leveydellä olevan merkittävä vaikutus ajonopeuksiin ja ajoneuvon sivuttaissijaintiin tielinjalla. Kapeammalla tiellä nopeus oli alhaisempi ja ajoneuvon sijainti lähempänä tien keskilinjaa kuin leveämmällä. Leveämmällä tiellä nopeudet olivat suurempia ja ajolinja kulki lähempänä kaistan ulkoreunaa. Mielenkiintoista oli, että suurin osa tutkimukseen osallistuneista mainitsi kolmella tiellä olleen eroavaisuuksia useissa asioissa (liikennemäärä, kaarteiden määrä ja vaikeus, liikennemerkkien määrä sekä tien linjaus), vaikka todellisuudessa mitään eroa näiden tekijöiden välillä ei ollut. Ainoa eroavaisuus teiden välillä oli niiden leveys. Testihenkilöille tehtiin myös kuvakysely, jossa pyydettiin arvioimaan muun muassa sopivaa ajonopeutta, ajosuorituksen vaikeutta, turvallisuutta, riskiä sekä tien leveyttä. Kummassakin testissä osallistujat vaikuttivat tekevän valintansa lähinnä alitajuisesti, eivätkä tietoisesti tieympäristöstä saatujen havaintojen perusteella.

Bella (2005) tutki ajosimulaattorin avulla ajoneuvojen nopeuksia ja sijaintia 2-kaistaisella maantiellä. Tutkimuksessa käytettiin kahta poikkileikkaukseltaan erilaista tietä. Poikkileikkaukset vastasivat italialaisia teknisiä säännöksiä (tyypit C1 ja F2). Tyypin C1 poikkileikkaus on kokonaisleveydeltään 10,5



m, jossa kaistojen leveydet ovat 3,75 m ja pientareiden 1,5 m. Tyypissä F2 arvot ovat vastaavasti 8,5 m, 3,25 m ja 1,0 m. Tielinjan pituus oli 8 km ja se koostui suorista, klotoideista ja ympyränkaarista ( $150 \text{ m} \leq R \leq 800 \text{ m}$ ). Koehenkilöt suorittivat 64 ajoa. Molemmilla poikkileikkauksilla jokaisella tielinjan elementillä määritettiin neljä parametria: keskinopeus, nopeuden vaihteluväli, keskimääräinen ajolinja ja sivuttaissijainnin vaihteluväli. Tulokset osoittivat, että nopeudet ovat leveämmällä poikkileikkauksella suuremmat kuin kapeammalla poikkileikkauksella. Erot nopeuksien muutoksissa tielinjan eri elementtien välillä vaihtelivat. Suurin muutos oli kaarteiden jälkeisten klotoideiden alueella, jossa nopeudet leveämmällä poikkileikkauksella olivat 21 % suuremmat kuin kapealla. Muiden elementtien alueella vastaavat muutokset olivat seuraavat: kaarteet +16 %, suorat +13 % ja kaarretta edeltävät klotoidit +12 %. Vaikka kapea tie alensi ajonopeuksia leveämpään verrattuna, ei se vaikuttanut kuljettajan tapaan säädellä nopeuttaan siirryttäessä tielinjan elementiltä toiselle. Huolimatta pienemmästä keskinopeudesta, kapeammalla tiellä nopeuden ja sivuttaissijainnin vaihteluvälit olivat suurempia.

Lundkvist ym. (1990) totesivat, että raskas liikenne ajaa keskimäärin lähempänä reunaa kuin kevyet autot sekä leveäkaistateilla että perinteisillä teillä. Henkilö- ja pakettiautojen sivuttaissijainnin hajonta yli kaksinkertaistuu leveällä kaistalla verrattuna normaalilevyiseen kaistaan. Tutkijat eivät osanneet selittää sitä, että tutkimuksessa leveäkaistaosuudella henkilöautojen keskinopeus oli alempi ja kuorma-autojen korkeampi kuin normaalilevyisellä osuudella. Mittaukset tehtiin analysointiteillä, jossa oli kaksi kohtisuoraan ja yksi vinosti ajokaistan ylittävä kaapeli. Tulosten tulkintaa vaikeuttaa se, että samalla tutkittiin reunaviivan muuttamista katkoviivasta yhtenäiseksi, joka vaikutti myös sekä nopeuksiin että sivuttaissijaintiin.

Örnek ja Drakopoulos (2007) analysoivat 12 500 kilometriä 2-kaistaisia maanteitä ja niillä sattuneita ulosajoja Wisconsinin osavaltiossa 5 vuoden (1998 - 2002) ajalta. Vähiten ulosajoja tapahtui teillä, joiden päällystetty piennar oli 3 ft (0,91 m) ja päällystämätön piennar 7 ft (2,13 m).

Leveäkaistateiden liikennevirtaa ja liikenneturvallisuutta pimeään aikaan ja hiljaisen liikenteen aikaan tutkittiin Ruotsissa. Lundkvist (1996) päätyi siihen, että hiljaisen liikenteen aikaan nopeudet nousivat ja onnettomuusriski kasvoi merkittävästi. Pimeällä autot ajoivat 0,3 – 0,5 m keskemmällä kuin päiväolosuhteissa poikkileikkauksesta riippumatta (Lundkvist 1994), mikä saattaa lisätä kevyen liikenteen turvallisuutta mutta lisätä kohtaamisonnettomuusriskejä. Pimeän ajan liikenteessä ne, jotka jo päivällä ajavat keskimääräistä hitaammin, eivät enää lisää hidasta vauhtiaan (Herland ja Lundkvist 1997), ja pimeän ajan ajonopeudet leveäkaistateilla ovat selvästi korkeampia kuin kapeammilla poikkileikkauksilla.

#### 5.4.3 Vaikutukset ohituksiin

Ohituksiin liittyviä tuoreimpia suomalaisten selvitysten tuloksia ovat muun muassa leveäkaistaisilla ja leveäpientareisilla teillä todetut ohitustiheyksien jopa 20 % kasvut (Tuovinen ja Enberg 2001, Tapio 2003). Leveäkaistaisilla teillä kolmannes ohituksista mahdollaan tekemään käyttämättä vastaantulijan kaistaa. Toisaalta leveäkaistateilla sulkuviivan kohdalla tehtävistä ohituksista 29 % rikotaan sulkuviivaa (Montonen ja Tuovinen 2005). Ohjeiden mukaan sellaisia leveäkaistateita, joilla tarvitaan tielinjalla sulkuviivoja, ei saa raken-

taa. Leveäkaistaisen tien valmistuttua kestää muutaman vuoden tien avaamisesta siihen, kun kuljettajat oppivat väistämään nopeampia ajoneuvoja, joskin osa varsinkin hitaasti ajavista kuljettajista ei joko huomaa tai halua väistää lähemmäksi reunaa (Harjula ja Summala 2001). Toisaalta ohittajat hyväksyvät leveäpoikkileikkauksilla teillä puolta lyhyemmät ohitusaikavälit vastaantulijoihin kuin kapeilla teillä (10 – 12 s vs. yli 20 s, Tapio 2003). Leveäkaistaisilla teillä tämä johtaa usein siihen, että vastaantulija joutuu väistämään ohittajaa. Lyhyt ohitusaikaväli korreloi luonnollisesti lyhyen vapaan ohitusnäkemän kanssa. Keskimäärin yli kilometrin mittaiset hyväksytyt ohitusnäkemät supistuvat 550 – 650 metriin leveäkaistaisilla teillä verrattuna noin 10-metrisiin vastaaviin pääteihin.

Suomessa on 2000-luvulla selvitetty leveäkaistatien vaikutusta ajokäyttäytymiseen. Leveäkaistainen tie kasvattaa ajonopeuksia ja samalla nopeushajontaa, lisää ohituksia, mutta ei vaikuta merkittävästi jonoutumiseen (Tuovinen ja Enberg 2001). Nopeuksia ja ohituksia selvitettiin sekä rekisteritunnusmenetelmällä että pistekohtaisilla mittauksilla. Samassa tutkimuksessa todettiin LAVEG-etäisyysmittarin avulla, että 29 % autoista ajoi niin reunassa, että niiden ohittaminen onnistui omalla kaistalla pysyen. Lyly ja Kuronen (2004) totesivat, että leveäkaistaisilla teillä ohituksia tehdään vastaantulijoista piittaamatta, ja että ulkomaalaisilla kuljettajilla on tapana ajaa keskemällä tietä kuin suomalaisilla. Vuoden 2005 mittaukset eivät enää tukeneet tätä havaintoa (Montonen ja Tuovinen 2005). Tässä tutkimuksessa todettiin myös, että leveäkaistatie kasvattaa ylinopeutta ajavien osuutta n. 10 %-yksikköä.

Lundkvist ym. (1990) arvioivat ohituksia leveäkaistatiellä verrattuna tavalliseen poikkileikkaukseen. Leveäkaistatiellä ohituksia tehdään useammin, ja suurempi osa niistä kyetään tekemään haittaamatta vastaantulevia ajoneuvoja. Arviot tehtiin silmämääräisesti. Myös tutkimuksessa Lundkvist (1994) tutkittiin ohituksia seuraamalla kuorma-autoja ja arvioimalla muun liikenteen käytöstä ohitustilanteissa silmämääräisesti. Leveä ajorata näytti houkuttelevan tekemään epäilyttäviä tai virheellisiä ohituksia useammin kuin ne tiet, joilla kokonaisleveydestä suurempi osa oli merkitty pientareiksi. Leveäkaistateillä kevyt liikenne pientareella aiheutti sekä henkilö- että kuorma-autoille suuremman sivuttaissiirtymän keskemälle tietä kuin leveäpientareisella poikkileikkauksella. Kapeakaistaisella tiellä kevyen liikenteen kohdalla hidastettiin nopeutta kun taas leveäkaistatiellä väistettiin ajonopeutta alentamatta.

## 5.5 Yhteisvaikutukset

Tien eri suunnitteluelementtien yhteisvaikutuksista nousevat esille seuraavat asiat. Linjauksen ja tasauksen yhteisvaikutusta kuvataan yleensä näkemillä, eikä eri osatekijöitä erotella tutkimustuloksissa.

- Kaarteissa tien leveys parantaa liikenneturvallisuutta. Leveys antaa pelivaraa kohtaamisiin ja ajolinjan sopeuttamiseen, samalla kun kevyt liikenne saa lisää tilaa.
- Vaaka- ja pystygeometrian yhteensovittaminen (taitepisteet ja elementtien suuruudet) nähdään tärkeäksi, mutta yleispäteviä ohjeita ei tutkimuksissa tarjota. Optisen ohjauksen selkeys ja tien linjauksen itsensä selittävyys helpottavat ajosuoritusta. Nykyiset suomalaiset



suunnitteluohjeet näyttävät olevan sopusoinnussa tutkimustulosten kanssa.

- Kuormittavuuden vähentämiseksi kuljettajan näkyvissä ei saisi olla yhtä aikaa useita elementtejä (kaarteet, pyöristyskaaret)
- Siirtymäkaarien pituuden valitseminen ajonopeus ja kaarresäde huomioon ottaen helpottaa ajoneuvon ohjausta ja antaa luonnollisen mahdollisuuden sivukaltevuuden muuttamiseen esimerkiksi kaksipuoleisesta yksipuoleiseksi. Ajodynamiikan ja optisen ohjauksen kannalta nykyiset suomalaiset ohjeet lienevät kohdallaan.

Leveyden ja linjauksen yhteisvaikutuksista on kokemusperäistä tietoa, jonka mukaan muuten huonon tien leventäminen ei paranna turvallisuutta. Ajonopeudet kasvavat, mutta onnettomuusriski ei pienene. Sama pätee myös päällystämiseen ja muun muassa reunapaalujen käyttöön. Toimenpiteet lisäävät ajonopeuksia, mutta eivät samalla pienennä onnettomuusriskiä niin paljon, että kohonneiden nopeuksien aiheuttama onnettomuusriskin kasvu kompensoituisi.

Geometrian yhteisvaikutuksia ohituksiin ja palvelutasoon tarkasteli Harwood ym. (2008) käyttämällä lähtökohtana ohitusnäkemää, määrittelemättä tarkemmin, mikä tekijä näkemän ratkaisee. Tiheästi tarjottu minimiohitusnäkemä ei heidän mielestään ole sen enempää turvallisuuden kuin sujuvuuden kannalta hyvä ratkaisu siihen verrattuna, että pitkiä ohituksen mahdollistavia osuuksia tarjotaan hieman harvemmin. Pitkä ohitusnäkemän tarjoava jakso antaa vastaantuleva liikenne huomioon ottaen todennäköisemmin myös käytännössä ohitusmahdollisuuden kuin lyhyet juuri ja juuri ohitusnäkemävaatimuksen täyttävät jaksot.

Nielsen (1999) selvitti hyväksytyjä ohitusnäkemä 80 km/h ja 90 km/h nopeusrajoitusalueilla käyttäen koekohteina suoraa tietä ja loivaa ( $R > 800$  m) kaarretta. Kohdeautolla ajettiin 20 km/h alle nopeusrajoituksen ja jokainen ohitustapahtuma analysoitiin. Ohitusnäkemä mitattiin a) arvioimalla ja laskemalla matka siitä kohdasta, missä ohittaja lähti vaihtamaan ajolinjaa siihen kohtaan, jossa vastaantulija kohtasi kohdeauton tai b) mittaamalla matka näkemäesteeseen siitä kohdasta, jossa ohitus alkoi. Ohittajan ja kohdeauton etäisyys ohituksen alkuhetkellä arvioitiin, muut matkat mitattiin joko tarkkuusmatkamittarilla tai sekuntikellolla mitattujen aikojen, kohdeauton nopeuden ja kohtaavan auton tutkalla mitatun nopeuden perusteella. Ohitukset luokiteltiin vielä lentäviin ja kiihdyttäviin sen mukaan, oliko ohittaja joutunut hidastamaan ajonopeutensa lähelle kohdeauton nopeutta ennen ohitustapahtumaa. Hyväksytyjen ohitusnäkemien keskiarvot eri tapauksissa on koottu taulukkoon 13. Erityisesti on huomattava, että vaikka ohituksia tehtiin kaarteissa vähemmän kuin suoralla, niin kaarteissa oltiin valmiita hyväksymään lyhyempi ohitusnäkemä kuin suoralla. Ero oli vielä suurempi kiihdyttämisen tehdyissä ohituksissa.



Taulukko 13. Hyväksytyjen ohitusnäkemien keskipituudet Nielsenin (1999) tutkimuksen mukaan.

Kohdeauton nopeus (km/h)		hyväksytty näkemä (m)			
		suora		kaarre	
		kiihdyttäen	lentävä	kiihdyttäen	lentävä
60	henkilöauto	481	435	399	407
	kaikki	496	462	399	406
70	henkilöauto	525	509		
	kaikki	524	479		

Carlsson (1993) vertaili hyväksytyjä ohitusnäkemä 8 – 9 m ja 13 m leveillä tieosuuksilla. Nopeusrajoitus oli joko 90 km/h tai 110 km/h. Hyväksytyt ohitusnäkemät mitattiin samoilla perusteilla kuin Nielsenin (1999) tutkimuksessa joko vastaantulijaan tai näkemäesteeseen. Tuloksia käytettiin myös simulointimallin kehittämiseen. Lopputuloksen oli, että leveillä teillä liikenteen sujuvuus säilyy korkeillakin liikennemäärillä (1600 autoa/h), matkanopeudet pysyvät yli 90 km/h ja jonossa ajon osuus jää 15 %:iin. Kapeammilla koeosuuksilla matkanopeus laskee alle 80 km/h jo 1000 autoa/h liikennemäärällä, ja jonossa ajon osuus nousee 60 %:iin. Suositukseksi pääteille määriteltiin, että leveillä teillä näkemän pitäisi olla aina vähintään 350 – 400 m, ja pidempiä, ohitukset mahdollistavia näkemä tarvitaan säännöllisesti. 9 m leveillä teillä tarvitaan vähintään 80 – 90 % tien pituudesta yli 300 m näkemät, ja 800 – 900 m näkemän tarjoava osuus ohituksia varten kilometrin välein. Jos näiden kapeiden teiden KVL lähestyy 7000 autoa, vastaavat näkemät olisi nostettava 500 metriin ja 1000 metriin. Jos KVL jää alle 3000, näkemäpituuksista voidaan vastaavasti tinkiä 50 – 100 m.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### Linjaus

Pienisäteiset kaarteet alentavat ajonopeutta, mutta eivät tarpeeksi, ja siksi ne heikentävät liikenneturvallisuutta. Erityisesti pitkät ja pienisäteiset kaarteet (suuri kääntymiskulma) ovat vaarallisia. Kuljettajien ajolinjat poikkeavat suunnitellusta erityisesti alle 200 metrin säteisissä kaarteissa. Linjauksen kaarresäteiden puutteiden kompensoiminen pelkästään tien leveyttä lisäämällä tai vaikkapa optista ohjausta (reunapaalut) parantamalla ei suomalais-ten kokemusten mukaan välttämättä paranna liikenneturvallisuutta.

Suurisäteiset kaarteet (vähintään 2000 m) voivat olla täysin suoraa tietä turvallisempia. Mahdollisten vastaan tulevien ajoneuvojen nopeus ja etäisyys on tällöin helpompi hahmottaa.

Ohjeiden mukaan valittu klotoidin arvo lisää ajomukavuutta, helpottaa ajo-suoritusta ja auttaa ajoneuvon hallinnassa.

### Tasaus

Jyrkät nousut ja laskut huonontavat liikenneturvallisuutta ja ovat varsinkin talviolosuhteissa myös sujuvuusongelma erityisesti raskaalle liikenteelle.

Kuperan taitteen kohdalla olevan loivan kaarteiden reuna ja ajoradan reunaviiva antavat optista ohjausta parantaen liikenneturvallisuutta. Suuret kuperat pyöristyssäteet eivät yleensä paranna sujuvuutta tai turvallisuutta, vaikka ne täyttäisivätkin ohitusnäkemävaatimukset. Ne on parempi korvata pidemmällä tasaisesti nousevilla ja laskevilla osuuksilla ja pienemmällä pyöristyssäteillä, jolloin kuperien osuuksien ulkopuolelle saadaan enemmän selkeää ohitusnäkemää.

Kuperat taitteet eivät juuri vaikuta ajonopeuteen, mutta lisäävät mm. kohtaamisonnettomuuksien riskiä. Nousuilla ja laskuilla on luonnollisesti vaikutus ajonopeuksiin. Koverien taitteiden vaikutuksia ei ole viime vuosina tutkittu, eikä maanteillä käytetyillä pyöristyssäteillä oleteta olevan turvallisuus- tai sujuvuusvaikutuksia.

### Tien leveys

Poikkileikkauksiin liittyvää tutkimusta on tehty viime vuosina enemmän kuin tasaukseen tai linjaukseen liittyvää. Tutkimustulosten mukaan tien leventäminen kasvattaa nopeuksia ja lisää ohitushalukkuutta, mutta onnettomuusriski ei useimpien tutkimusten mukaan kuitenkaan kasva. Useimmiten tien leventäminen lisää sekä nopeuksia että turvallisuutta, jos myös muu geometria on korkeatasoinen.

Kapealla tiellä nopeus on alhaisempi ja ajoneuvon sijainti lähempänä tien keskilinjaa kuin leveällä tiellä. Raskas liikenne ajaa keskimäärin lähempänä tien reunaa kuin kevyet autot sekä leveäkaistateilla että perinteisillä teillä. Leveäkaistainen tie kasvattaa ajonopeuksia ja samalla nopeushajontaa sekä lisää ohituksia. Suuri osa ohituksista kyetään tekemään haittaamatta vastaantulevia ajoneuvoja.



### **Suuntauksen tasalaatuisuus ja yhteisvaikutukset**

Tiegeometrian tasalaatuisuus on vähintään yhtä tärkeä ominaisuus kuin yksittäisten elementtien suuruus. Tieosuuden nopeusrajoitus määräytyy geometrialtaan ja näkemäolosuhteiltaan heikoimpien tien kohtien mukaan. Tieosuuden muissa kohdissa geometria saattaa sallia huomattavasti suuremmat nopeudet, mikä houkuttelee nopeusrajoituksen ylityksiin. Vaarana on liian suuri nopeus tultaessa vaativampaan kohtaan ja suurempi onnettomuusriski.

Lyhyet alennetut nopeusrajoitusjaksot poikkeuksellisen hankalan geometrian osuuksilla olisivat edullinen väliaikaisratkaisu, jos esim. yksittäisonnettomuudet ovat ongelma. Vastaavasti hyvien jaksojen korkeammat nopeusrajoitukset voisivat lisätä kuljettajien motivaatiota rajoitusten noudattamiseen yleisemminkin. Toisaalta kuljettajien on hankala muistaa usein vaihtuvia rajoituksia, joten rajoitusten vaihtelua ei saisi olla liikaa.

Sään, kelin ja valaistusolosuhteiden muutokset rajoittavat tavanomaisesta poikkeavien geometristen ratkaisujen käyttämistä. Kuljettajien turvallisuuden kannalta ennakoitavuus ja tasalaatuisuus ovat tärkeitä.

### **Ohitusmahdollisuudet**

Yksiajorataisilla kaksikaistaisilla teillä ohitusmahdollisuudet vähenevät liikennemäärän kasvaessa, kun vastaantuleva liikenne estää ohitukset niilläkin osuuksilla, joilla ohitusnäkemä löytyy.

Ohitusmahdollisuuksien puute johtaa sujuvuusongelmien lisäksi myös riskinottoon. Ohitusnäkemä kannattaa siksi yrittää järjestää aina kun se on mahdollista. Näin voidaan rauhoittaa liikennevirtaa ja vähentää riskinottoa. Olemassa olevilla teillä parantamismahdollisuudeksi jää usein ohituskaistan rakentaminen.

### **Self-explaining roads**

Self-explaining-roads -ajattelua on ollut selvästi vaikeampi tuoda tyypillisiin maantieolosuhteisiin kuin taajamateille tai -kaduille (Tiehallinto 2007).

Kuljettajiin vaikuttavat tiegeometriset keinot ovat tehokkaimpia alhaisilla ja korkeilla nopeuksilla (30 – 50 km/h tai 120 km/h). Alemmilla nopeusrajoituksilla voidaan käyttää niin pieniä mitoituselementtejä, että niillä on vaikutusta, ja moottoritienopeuksilla kuljettajat huomaavat sivuttaiskihtiyyden jo kohdittuullisen suurillakin kaarresäteillä. Tavallisilla maanteiden nopeustasoilla (80 – 100 km/h) geometrian määräävät yleensä liikenteen sujuvuustavoitteet, ohitusmahdollisuudet ja turvallisuus eikä operationaaliseen ajamiseen (lähinnä ajonopeuteen) vaikuttaminen.

Kirjoittajien mielestä suunniteltavan tien mitoitusnopeutta valittaessa pitäisi olla tiedossa tuleva nopeusrajoitus, ja ylilaadun rakentamista (mitoittaminen nopeusrajoitusta korkeammalle nopeustasolle) pitäisi välttää, sillä se hämärtää liikenneympäristön oikeaa hahmottamista.

Ongelmallisia ovat myös tapaukset, joissa nopeusrajoitusta lasketaan liikennemäärien, ympäröivän maankäytön, liikenneturvallisuuden tai muun syyn



takia, mutta geometria jää ylemmän nopeustason mukaiseksi. Tämä voi aiheuttaa ristiriitaisia tuntemuksia kuljettajissa. Kun nopeutta alennetaan suuren liikennemäärän vuoksi, voivat tilannetta helpottaa eri nopeusrajoitukset ruuhkaisena ja hiljaisena aikana. Muissa tapauksissa myös poikkileikkausta olisi tarpeen muuttaa.

### **Muita havaintoja ja jatkoselvitystarpeita**

Tiestö, ajoneuvot, liikenne ja myös kuljettajat ovat muuttuneet. Suomen maanteillä vakavia geometriapuutteita esiintyy yleensä vain vanhimmilla teillä ja alemmalla tieverkolla. Esimerkiksi väärät tai puutteelliset sivukaltevuudet ovat ongelma lähinnä sorateilla.

Eri nopeuskäsitteitä ei kaikissa selvityksissä ja tutkimuksissa ole määriteltä tarkasti. Nopeusrajoitus ei ole sama kuin kuljettajan vapaissa liikenneolosuhteissa valitsema nopeus. Turvallinen tilannenopeus poikkeaa kummastakin. Tutkimustuloksissa ei useinkaan mainita nopeusrajoitusta tai nopeustason vaikutusta, kun kerrotaan tiegeometrian vaikutuksesta nopeuteen. Esitetyt tulokset eivät välttämättä päde suoraan kaikilla nopeustasoilla.

Tiegeometrian vaikutusta ajamiseen on tutkittu viime vuosina melko vähän. Tämä näkyy myös tämän työn lähteiden sisällöstä. Niissä on tarkasteltu lähinnä tiegeometrian vaikutusta operationaaliseen tasoon (kiihdytys, jarrutus, ajoneuvon sijainti, ajolinja). Ajonopeuden valinta on jäänyt vähemmälle, ja varsinkin muu ajokäyttäytyminen (riskinotto, ohitukset, yllätyksettömyys, ajomukavuus). Tiensuunnittelun keinojen tutkimus on jäänyt sekä Euroopassa että USA:ssa liikennetelematiikan tutkimuksen jalkoihin.

Telemaattisten keinojen käyttöä väliaikaisena ratkaisuna geometrialtaan puutteellisilla tiejaksoilla olisi syytä selvittää. Nykyään telematiikkaa käytetään usein muutenkin korkealaatuisilla väylillä.

Suunnittelijalla voi olla houkutus käyttää alun perin tavoitteena ollutta korkeampitasoisia suunnitteluelementtejä, jolloin tulos ei vastaa uudelle väylälle asetettua standardia. Lisäksi olisi hyvä seurata, miten tienkäyttäjät käytännössä noudattavat nopeusrajoitusta eri mitoitusnopeuden teillä.

Tietopuutteet ja jatkotutkimustarpeet näyttävät liittyvän erityisesti sää-, keli ja valaistusolosuhteisiin, eri geometriaelementtien yhteisvaikutuksiin, eri ajoneuvo- ja liikkujaryhmien huomioon ottamiseen (raskas ja kevyt liikenne) sekä esimerkiksi ajoneuvojen sivuittaisaseman ja sen merkityksen ymmärtämiseen. Yksi mahdollisuus lisätiedon saamiseen olisivat kuljettajien katseen kohdistumista analysoivat tutkimukset geometrialtaan erilaisilla tiejaksoilla.

Autotekniikan kehittyminen ja liikennemäärien kasvu muuttavat liikenteessä toimimista ja sen reunaehdoja. Vakionopeussäätimet ja muu automatiikka yleistyvät koko ajan. Kun monet uudet laitteet on suunniteltu nimenomaan parantamaan turvallisuutta, niin vakionopeussäätimet sen sijaan vähentävät nopeuden sovittamista tienkohdan mukaiseksi, eli vähentävät tiegeometrian vaikutusta ajokäyttäytymiseen. Asiaa voitaisiin tutkia vertaamalla pistenopeuksia suorilla ja kaarteissa ja haastattelemalla kuljettajia.

Monet tutkimukset käsittelevät ajokäyttäytymistä tilastollisina suureina ja keskiarvoina, jolloin kuljettajien toiminnan takana olevia syitä ei yleensä ana-

lysoida. Kuljettajan toiminnan analyysi jonkin käyttäytymistieteellisen mallin pohjalta helpottaisi useiden tutkimusten tulosten sovellettavuuden arviointia. Esimerkiksi tarvittaisiin tutkimusta ohittavan kuljettajan havainnoinnista ja päätöksenteosta erilaisissa tieympäristöissä. Voidaan myös kysyä, onko esimerkiksi Etelä- ja Pohjois-Suomessa asuvien kuljettajien välillä eroja ohituskäyttäytymisessä. Etelässä liikutaan enemmän taajamissa ja moottoriteillä, Keski- ja Pohjois-Suomessa ollaan tottuneempia ajamaan vähäliikenteisillä kaksikaistaisilla teillä.

## 7 LÄHTEET

Anderson, I.B. ja Krammes, R.A. (2000). *Speed Reduction as a Surrogate for Accident Experience at Horizontal Curves on Rural Two-Lane Highways*. Transportation Research Record 1701, 86-94.

Bella, F. (2005). *Speeds and Lateral Placements on Two-Lane Rural Roads; Analysis at the Driving Simulator*. Road Safety on Four Continents: 13th International Conference. VTI.

Björkman, K. ja Karlsson, A. (2006). Trafiksäkra vägar genom god vägutforming baserat på kunskap om det mänskliga beteendet. Chalmers tekniska högskola. Göteborg 2006.

Carlsson, Arne (1993). Linjeföring och omkörningssikt. VTI meddelande 712/1993.

Elvik, R., Erke, A., Vaa, T. ja Borger, A. (2004, 2008). *Trafikksikkerhetshåndboken*. Transportøkonomisk institutt, Oslo.

Erath, A. & Fröhlich, P. (2004). Die Geschwindigkeiten im PW-Verkehr und die Leistungsfähigkeiten von Strassen über den Zeitraum 1950-2000. COST 340: Entwicklung des Transitverkehrs-Systems und deren Auswirkung auf die Raumnutzung in der Schweiz

Fitzpatrick, K., Wooldridge, M.K., Tsimhoni, O., Collins, J.M., Green, P., Bauer, K.M., Parma, K.D., Koppa, R., Harwood, D.W., Anderson, I., Krammes, R.A. ja Poggioli, B. (2000). *Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways*. Publication No. FHWA-RD-99-172. Federal Highway Administration.

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D.W., Collins, J.M., McFadden, J., Anderson, I.B., Krammes, R.A., Irizarry, N., Parma, K.D., Bauer, K.M. ja Passetti, K. (2000). *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*. Publication No. FHWA-RD-99-171. Federal Highway Administration.

Hartikainen, O-P & Kuronen, H. (1999). *Tien- ja kadunsuunnittelu*. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.

Harjula, Jukka ja Summala, Heikki (2001). Passiivinen ohituskäyttäytyminen eri ikäisillä leveäkaistateilla: S12 Pääteiden parantamisratkaisut. Tiehallinnon selvityksiä 12/2001.

Harwood, D.W., Gilmore D.K., Richard, K.R., Dunn, J.M., Sun, C (2008). *Passing Sight Distance Criteria*. NCHRP Report 605. Transportation Research Board, Washington D.C. 2008

Hatakka, M., Keskinen, E., Gregersen, N. P., Glad, A., Hernetkoski, K. (2002). From control of the vehicle to personal self-control; broadening the perspectives to driver education. Transportation Research Part F. Traffic Psychology and Behaviour, 5 (3), 201-215.

12



Haynes, R., Lake, I.R., Kingham, S., Sabel, C.E., Pearce, J. ja Barnett, R. (2007). The influence of road curvature on fatal crashes in New Zealand. *Accident Analysis and Prevention* 40, 843-850.

Herland, L., Lundkvist, S-L. (1997). Mörkertrafik på vägar med breda körfält. VTI notat 29/1997. Linköping 1997

Hu, W. ja Donnell, E.T. (2007). *Models of Acceleration and Deceleration Rates on a Complex Two-Lane Rural Highway: Result from a Nighttime Driving Experiment*. Transportation Research Board 87<sup>th</sup> Annual Meeting, TRB

Häkkinen, S. & Luoma J. (1990). *Liikennepsykologia*. Otatieto Oy, Espoo.

Keskinen, Esko (2008). Kuljettajakäyttäytymisen laajennettu hierarkinen teoria ja sen käyttö kuljettajakoulutuksessa – ongelmia ja ratkaisuja. *Psykologia 2008 – kongressi*, Helsinki.

Keskinen, E. (2003) *Driver Licensing or Driver Education: Recent trends in European driver education, Presentation in Jornadas de Reflexión, 2ª Edición, ¿Formación o Educación vial? (Reflection days, 2nd Edition), 17.11.2003, INTRAS, Madrid*

Lamm, R., Psarianos, B ja Cafiso, S. (2002). *Safety Evaluation Process for Two-Lane Rural Roads: A 10-Year Review*. Transportation Research Record 1796, 51-59.

Leemann, N (2007). Analyse von Zusammenhängen zwischen Veränderungen an Anlage und Verkehrsablauf und dem Unfallgeschehen – Ableitung von Quantifizierungswerkzeugen zur Beurteilung der Verkehrssicherheit. Technischer Bericht. Diplomarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Lewis-Ewans, B. ja Charlton, S.G. (2005). *Explicit and Implicit processes in behavioural adaptation to road width*. *Accident Analysis and Prevention* 38, 610-617.

Lundkvist, S-O, Ytterbom U, Runersjö L, Lauridsen I (1990). Trafikmätningar på väg med brett körfält i Danmark. VTI notat TF 55/15. Linköping 1990

Lundkvist, Sven-Olof (1994). Trafikbeteende på 13 meter breda vägar med olika körfältsindelning. VTI notat 7/1994. Linköping 1994

Lundkvist, Sven-Olof (1996). Lågtrafik på vägar med breda körfält. VTI notat 52/1996. Linköping 1996

Lyly, Tomi; Kuronen, Pauliina (2004) Ajokäyttäytyminen leveäkaistatiellä – Ajo-opasteiden vaikutukset ja ohitustilanteet. Tiehallinnon selvityksiä 50/2004

Messer, C.J. (1980). Methodology for Evaluating Geometric Design Consistency. Facility Design and Operational Effects. Transportation Research Record 757, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. pp. 7-14.

14

Montonen, Sakari; Tuovinen, Paula (2005) Ajokäyttäytyminen leveäkaistaisella tiellä. Valtatie 6 välillä Koskenkylä-Kouvola. Helsinki, Tiehallinnon selvityksiä 60/2005.

Nielsen, Michael Aakjer (1999). Overhalingsadfaerd på 2-sporede veje. Dansk Vejtidskrift 4/99.

Nilsson, L., Simonsson, S. ja Wallman, C-G (1989). *Trafikledsteknik Del 1: Vägar, gator, trafik och miljö*. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för vägbyggnad.

Ottesen, J.L. ja Krammes, R.A. (2000) *Speed Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in United States*. Transportation Research Record 1701, 76-85.

Perco, P. (2006). *Desirable Length of Spiral Curves for Two-Lane Rural Roads*. Transportation Research Record 1961, 1-8. TRB, Washington D.C., 2006

Perco, P. (2007). *Influence of the General Character of the Horizontal Alignment on the Operating Speed of Two-Lane Rural Roads*. Transportation Research Board 87<sup>th</sup> Annual Meeting, TRB

Räsänen J. (1990). *Tierekisteritietoihin perustuvat ajokustannusmallit henkilöautoille*. Diplomityö, TKK.

Schrey A. ja Anteroinen H. (1991). *Ennakoivan ajamisen kurssi raskaiden ajoneuvojen kuljettajille. Opetussuunnitelma. Liikenneturva. Helsinki*

Spacek, P. (2004). *Influence of Speeds on Design standards in Switzerland*. Transportation Research Record 1881/2004.

Spacek, P. (2005). *Track Behavior in Curve Areas: Attempt at Typology*. Journal of Transportation Engineering, ASCE American Society of Civil Engineers

Staplin, L., Ball, K., Park, D., Decina, L.E., Lococo, K.H., Gish, K.W., ja Kotwal, B. (1997). *Synthesis of Human Factors Research on Older Drivers and Highway Safety Volume II: Human Factors and Highway Safety Research Synthesis*. Publication No. FHWA-RD-97-095. Federal Highway Administration, Washington DC.

Summala Heikki (2001). Liikennekäyttäytyminen ja onnettomuudet. Taus-taselvitys. S12 Pääteiden parantamisratkaisut. Tiehallinnon selvityksiä 35/2001. Helsinki 2001

Tapio, Juha 2003. Ohitukset kaksikaistaisilla teillä. Tiehallinnon selvityksiä 47/2003. Tiehallinto, liikennetekniikka, Helsinki 2003

Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 30/1999, TIEL 4000212. *Parannettavien pääteiden suuntaus*. Tielaitos, Helsinki, 1999

Tiehallinnon ohje T-325/29.1.1975. *Teiden suunnittelu III 2. Tien suuntauksen suunnittelu (KANSIO A)*.



Tiehallinnon ohje 794/2000/20/22. LVM:n ohje yleisten teiden näkemäalueista. Tiehallinto, Helsinki, 2002

Tiehallinnon selvityksiä 58/2004. *Kuljettajiin vaikuttaminen liikenneympäristön suunnittelulla, TØI -raportin 648/2003 käännös.* Sagberg, F (2003). *Påvirkning av bilførere gjennom utforming av vegsystemet.* Tiehallinto, Helsinki, 2004

Tiehallinto 2007. Käyttäjää ohjaavien teiden suunnittelu. Esiselvitys self explaining roads periaatteesta ja sovellutuksista Euroopassa. Tiehallinnon selvityksiä 23/2007.

Tuovinen Paula, Enberg Åsa (2001). *Nopeusrajoituksen vaikutus ohituksiin kaksikaistaisilla maanteillä : kirjallisuustutkimus : S12 Pääteiden parantamisratkaisut.* Tiehallinnon selvityksiä 57/2001.

Tuovinen Paula, Enberg Åsa (2001b). *Tavallisen ja leveäkaistatien liikennevirran ominaisuudet Vt 6 Kaipiainen-Kaitjärvi: S12 Pääteiden parantamisratkaisut.* Tiehallinnon selvityksiä 14/2001.

US Dot 2007. Advanced Driver Fatigue Research. US Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, April 2007

Wooldridge, M.D., Fitzpatrick, K., Koppa, R. ja Bauer, K. (2000). *Effects of Horizontal Curvature on Driver Visual Demand.* Transportation Research Record 1737, 71-77.

Wooldridge, M.D., Fitzpatrick, K., Harwood, D.W., Potts, I.W., Elefteriadou, L. ja Torbic, D.J. (2003). *Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways.* NCHRP Report 502. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Örnek, E. ja Drakopoulos, A. (2007). *Analysis of Run-Off-Road Crashes in Relation to Roadway Features and Driver Behavior.* 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Iowa State University, Ames.

Zeeger, C.V., Hummer, J., Reinfurt, D., Herf, L., and Hunter, W. (1987). *Safety Effects of Cross-Section Design for Two-Lane Roads, Volumes I and II.* Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-87-008, Washington, DC.

Zeeger, C., Stewart, R., Reinfurt, D., Council, F.M., Neuman, T., Hamilton, E., Miller, T., and Hunter, W. (1990). *Cost Effective Geometric Improvements For Safety Upgrading of Horizontal Curves.* Publication No. FHWA-RD-90-021, University of North Carolina, Highway Safety Research Center, Chapel Hill, NC.



## 8 MUUTA KIRJALLISUUTTA

Työn aikana arvioitiin suuri määrä teoksia ja artikkeleita, jotka eivät sinänsä tuoneet uutta juuri tähän selvitykseen. Koska ne kuitenkin sisältävät tiesuunnittelua ja autoilijoiden ajokäyttäytymistä koskevia tuloksia, jolla voi olla merkitystä jotain aihetta yksityiskohtaisemmin tutkittaessa, ne on koottu tähän luetteloon.

AAA (American Automobile Association). (1995). *Safety Effects Resulting From Approval of The National Highway System*. Foundation for Traffic Safety, Bellomo-McGee, Inc., Vienna, VA.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (1984). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (1990). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (1994). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.

Adrian, W. (1994). "Road Reflection Properties and Their Mathematical Representation." *Proceedings of the TRB Nighttime Visibility Symposium*.

Alexander, G.J. and Lunenfeld, H. (1986). *Driver Expectancy in Highway Design and Traffic Operations*. Publication No. FHWA-TO-86-1, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Allen, T.M., Lunenfeld, H. & Alexander, G.J. (1971) *Driver information needs*. Highway Research Record 366, 102-115.

Babkov, V.F. (1975). *Road Conditions and Traffic Safety*. Mir Publishers, Moscow, Russia.

Baldwin, D.M. (1946). *The Relation of Highway Design to Traffic Accident Experience*. American Association State Highway Transportation Officials, Convention Group Meeting, Washington, DC.

Bali, S., Potts, R., Fee, J.A., Taylor, J.I., and Glennon, J. (1978). *Cost-Effectiveness and Safety of Alternative Roadway Delineation Treatments for Rural Two-Lane Highways. Volume II: Final Report*. Publication No. FHWA-RD-78-51, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Balogh, T. (1967). "Effect of Design Parameters, of Public Highways on Traffic Safety." *Kozlekedestudomány*, 17, pp. 394-403.

Berger, C. (1943). Stroke-Width, Form and Horizontal Spacing of Numerals as Determinants of the Threshold of Recognition. Stroke-Width, Form and Horizontal Spacings of Numerals, pp. 208-231.

Billion, C.E. (1955). "Effect of Median Dividers on Driver Behavior." Highway Research Board Bulletin.

Bitzl, F. (1964). "The Safety Level of Roads." *Strassenverkehrstechnik*, 28.

Blaauw, G.J. (1985). "Vehicle Guidance by Delineation Systems at Night." *Ergonomics*, 28(12), pp. 1601-1615.

Blaauw, G.W. and Padmos, P. (1982). Nighttime Visibility of Various Types of Road Markings. A Study on Durability, Including Rain, Fog, and Dew. Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper Series, Paper No. 820412.

Blackwell, H.R. (1946). "Contrast Thresholds of the Human Eye." *Journal of the Optical Society of America*, 36, pp. 624-643.

Blackwell, O.M. and Blackwell, H.R. (1971). "Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages." *Journal of Illuminating Engineering Society*, October.

Blackwell, H.R. and Taylor, J.H. (1969). "Survey of Laboratory Studies of Visual Detection." NATO Seminar on Detection, Recognition, and Identification of Line-of-Sight Targets, The Hague, Netherlands.

Boynton, R.M. and Miller, N.R. (1963). "Visual Performance Under Conditions of Transient Adaptation." *Journal of Illuminating Engineering Society*, 58, pp. 541-550.

Chang, M.S., Messer, C.J., and Santiago, A. (1984). "Evaluation of Engineering Factors Affecting Traffic Signal Change." *Transportation Research Record*, 956.

Chang, M.S., Messer, C.J., and Santiago, A. (1985). "Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior." *Transportation Research Record*, 1027.

Choueiri, E. M. and Lamm, R. (1987). *Rural Roads Speed Inconsistencies Design Methods: Part I, Operating Speeds and Accident Rates on Two-Lane Rural Highway Curved Sections*. Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, NY.

Cirillo, J.A. and Council, F.M. (1986). "Highway Safety: Twenty Years Later." *Transportation Research Circular*, 1068, pp. 90-95.

Clear, R. and Berman, S. (1983). Fundamental Problems with Visual Performance Research Described in the Commission Internationale De L'Éclairage (CIE) 19/2 Report. Report for Department of Energy Contract DE-AC03-76SF00098, Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory.

14



Cole, B.L., and Hughes, P.K. (1984). "A Field Trial of Attention and Search Conspicuity." *Human Factors*, 26(3), pp. 299-313.

Cottrell, B.H., Jr. (1987). "Evaluation of Wide Edgelines on Two-Lane Rural Roads." *Transportation Research Record*, 1160.

Darzentas, J. and McDowell, M.R. (1981). "Driver Behavior at Unlit Non-Urban T-Junction in Daylight and Darkness." *Journal of Operational Research Society*.

Donaldson, G.A. (1986). "Safety of Large Trucks and the Geometric Design of Two-Lane, Two-Way Roads." *Transportation Research Record*, 1052.

Duntley, S. (1948). "The Visibility of Distant Objects." *Journal of the Optical Society of America*, 38(3), pp. 237-249.

Eckhardt, P.K., and Flanagan, J.C. (1956). "Role of Roadway Elements in Pennsylvania Turnpike Accidents." *Highway Research Board Bulletin*.

Farber, E. (1982). "Driver Eye-Height Trends and Sight Distance on Vertical Curves." *Transportation Research Record*, 855.

Forbes, T.W. and Holmes, R.S. (1939). "Legibility Distances of Highway Destination Signs in Relation to Letter Height, Width, and Reflectorization." *Highway Research Board*, 19, pp. 321-326.

Freedman, M.L., Staplin, L., Gilfillan, D., and Brynes, A.M. (1988). Noticeability Requirements for Delineation on Non-Illuminated Highways. Publication No. FHWA-RD-88-028, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Frick, W.A. (1968). "The Effect of Major Physical Improvements on Capacity and Safety." *Traffic Engineering*.

Fukutome, I. and Moskowitz, K. (1963). "Traffic Behavior and Off-Ramp Design." *Highway Research Record*, 21.

Georgeson, M. and Sullivan, G. (1975). "Contrast Constancy: Deblurring in Human Vision by Spatial Frequency Channels." *Journal of Physiology*, 252, pp. 627-656.

Gish, K. (1990). "Model of Visual Degradation Due to Glare." *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 61(5), pp. 454.

Glennon, J.C., Neuman, T.R., and Leisch, J.E. (1985). *Safety and Operational Considerations for Design of Rural Highway Curves*. Publication No. FHWA-RD-86-035, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Glennon, J.C. and Weaver, G.D. (1971). *The Relationship of Vehicle Paths To Highway Curve Design*. Texas Highway Department, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.



Good, M.C. (1978). "A Review of Empirical Studies of Driver-Vehicle Behavior on Road Curves." Road Curve Geometry and Driver Behavior, Special Report, 15, pp. 75-92.

Good, M.C. (1978). "Road Curve Geometry and Driver Behavior." Australian Road Research Board, Australia.

Good, M.C. and Baxter, G.H. (1986). "Evaluation of Short Range Roadway Delineation." Human Factors, 28(6).

Gordon, D.A., McGee, H.W., and Hooper, K.G. (1984). "Driver Characteristics Impacting Highway Design and Operations." Public Roads, 48(1), pp. 12-16.

Gordon, D. and Schwab, R. (1979). "The Application of Visibility Research to Roads and Highways." Public Roads, 43(1), pp. 15-22.

Gupta, R.C. and Jain, R. (1973). *Effect of Certain Geometric Design Characteristics of Highways on Accident Rates for Two-Lane, Two-Way Roads in Connecticut*. School of Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT.

Hall, J.W. (1987). "Evaluation of Wide Edgelines." Transportation Research Record, 1114.

Hancock, P.A., and Parasuraman, R. (1992). "Human Factors and Safety in the Design of Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS)." Journal of Safety Research, 23(4), pp. 181-198.

Haywood, J.C. (1980). "Highway Alignment and Super-elevation: Some Design-Speed Misconceptions." Transportation Research Record, 757.

Hedin, A. and Lovsund, P. (Unknown). "VII 4 Effects of Visual Field Defects on Driving." Performance, 541-547.

Hills, B.L. (1980). "Vision, Visibility, and Perception in Driving." Perception, 9, pp. 183-216.

Hughes, P.K. and Cole, B.L. (1986). "What Attracts Attention When Driving?" Ergonomics, 29(3), pp. 377-391.

Hughes, W.E., McGee, H.W., Hussain, S., and Keegal, J. (1989). Field Evaluation of Edgeline Widths. Publication No. FHWA-RD-89-111, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Huttula, Jani. (1996) Liikenneympäristön, auton ja kuljettajan ominaisuuksien yhteyksiä kohtaamisonnettomuuteen johtaneeseen ajohallinnan menetykseen. ISBN 951-42-4401-X (nid.)

Inditsky, B., Boadmann, H., and Fleck, H. (1982). "Elements of Visual Performance." Lighting Research and Technology, 14(4), pp. 218-231.

10

ITE (Institute of Transportation Engineers). (1982) Transportation and Traffic Engineering Handbook. Institute of Transportation Engineers. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Johnson, I.R. (1984). The Effects of Roadway Delineation on Curve Delineation By Both sober and Drinking Drivers. Australian Road Research Board, 128.

Johnston, I.R. (1982). "Modifying Driver Behavior on Rural Road Curves- A Review of Recent Research." Proceedings of the Eleventh Australian Road Research Board Conference, University of Melbourne, Australia.

Kanellaidis, G. (1991). "Aspects of Highway Super-Elevation Design." *Journal of Transportation Engineering*, 117(6), pp. 624-632.

Keller, J.A. (1993). "Interchange Ramp Geometrics - Alignment and Super-Elevation Design." *Transportation Research Record*, 1385.

Khasnabis, S. and Tad, R.R. (1983). "A Reevaluation of Crest Vertical Curve Length Requirements." *Transportation Quarterly*, 37(4), pp. 567-582.

Kihlberg, K.K. and Tharp, K.J. (1968). Accident Rates as Related to Design Elements of Rural Highways. National Cooperative Highway Research Program, Report No. 47.

Kiljunen Matti, Summala Heikki (1996). Ruuhkaisuuden kokeminen ja liikennetiedottaminen. Tielaitoksen selvityksiä 25/1996.

King, G.F. & Lunenfeld, H. (1971) *Development of information requirements and transmission techniques for highway users*. NCHRP Report 123. Washington, D.C.: Highway Research Board.

Kostyniuk, L.P. and Cleveland, D.E. (1986). "Sight Distance, Signing, and Safety on Vertical Curves." *Institute of Transportation Engineers Journal*, 56(5), pp. 25-28.

R. A. Krammes, R. Q. Brackett, M. A. Shafer, J. L. Ottesen, I. B. Anderson, K. L. Fink, K. M. Collins, O. J. Pendleton, and C. J. Messer. *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*. Report No. FHWA-RD-94-034, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1995.

Krebs, H.G. and Kloeckner, J.H. (1977). "Investigation of the Effects of Highway and Traffic Conditions Outside Built-Up Areas on Accident Rates." *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, 223.

Kunze, U. (1976). *Sight Distance and Cross Section as Influence Parameters of the Accident Situation*. University of Karlsruhe, Germany.

Lefevre, B.A. (1953). "Speed Characteristics on Vertical Curves." *Highway Research Board Proceedings*, 32, pp. 395-413.

Leisch, J.E. (1977). "Dynamics of Highway Design For Safety." *Transportation*, 6(1), pp. 71-83.

Livneh, M., Polus, A., and Factor, J. (1988). "Vehicle Behavior on Deceleration Lanes." *Journal of Transportation Engineering*, 114, pp. 706-717.

Lum, H.S. and Hughes, W.E. (1990). "Edgeline Widths and Traffic Accidents." *Public Roads*, 54(1).

Lunenfeld, H. (1993). "Human Factors Associated with Interchange Design Features." *Transportation Research Record*, 1385.

McDonald, L.B. and Ellis, N.C. (1975). "Driver Work Load for Various Turn Radii and Speeds." *Transportation Research Record*, 530.

McFarland, W.F., Griffin, L.I., Rollins, J.B., Stockton, W.R., Phillips, D.T., and Dudek, C.L. (1979). Assessment of Techniques for Cost-Effectiveness of Highway Accident Countermeasures. Publication No. FHWA-RD-79-53, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX.

McGee, H.W. and Hooper, K.G. (1983). Highway Design and Operations Affected by Driver Characteristics. Final Report, Publication No. FHWA-RD-83-015, Federal Highway Administration, Washington, DC.

McLean, J. (1981). "Driver Speed Behavior and Rural Road Alignment Design." *Traffic Engineering and Control*, 22(4), pp. 208-211.

McLean J. R. (1989). Two-Lane Highway Traffic Operations. Theory and Practice. Gordon and Breach Science Publishers. 408 s.

Messer, C.J., Mounce, J.M., and Brackett, R.Q. (1981). *Highway Geometric Design Consistency Related To Driver Expectancy*. Publication No. FHWA-RD-81-035, Federal Highway Administration., Washington, DC.

Michon, J. (1985) A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? I: Evans, L. & Schwing, R.C. Human behavior and Traffic Safety. New York: Plenum Press.

van der Molen, H.H. & Bötticher, A.M. (1988) A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics* 31(4), 537-555.

Mullins, B. and Keese, C. (1961). "Freeway Traffic Accident Analysis and Safety Study." *Highway Research Board Bulletin*, 291.

Neuman, T.R. (1992). "Chapter 6: Roadway Geometric Design." In: Pline, J.L. (Eds). *Traffic Engineering Handbook*, Fourth Edition. Institute of Traffic Engineers. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Neuman, T.R. (1993). "Roadway Geometric Design." *Traffic Engineering Handbook*, Prentice Hall, NY.

15



Niessner, C.W. (1984). Raised Pavement Markers at Hazardous Locations. Publication No. FHWA-TS-84-215, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Nilsson, G. (1975). *Prediction Model for Traffic Accidents*. Report 4.1.2.1, 15th World Road Congress, PIARC.

Näätänen, R. & Summala, H. (1974) A model for the role of motivational factors in drivers' decision-making. *Accident Analysis and Prevention* 6, 243-261.

Oppenlander, J.C. and Dawson, R.F. (1970). "Traffic Control and Roadway Elements-Their Relationship to Highway Safety." Revised, Chapter 9 - Interchanges.

Oyama, T. (1987). "Perception Studies and Their Application to Environmental Design." *International Journal of Psychology*, 2(4).

Robinson, G.H., Erickson, D.J., Thurston, G.L. and Clark, R.L. (1972). "Visual Search By Automobile Drivers." *Human Factors*, 14(4), pp. 315-323.

Rockwell, T.H. and Smith, G.L. (1985). Recommended Delineation Treatments at Selected Situations on Rural state Highways, Part 2: Effects of Delineation Treatment on Curve Detection Distances Under Simulated Rural Nighttime Driving Conditions. Ohio State University, Columbus, OH.

Schwab, R.N. and Capelle, D.G. (1979). "Is Delineation Needed?" *Public Roads*, 43(3).

Sheridan, T.B. (1991). Human Factors of Driver-Vehicle Interaction in the IVHS Environment. Publication No. NHTSA/MIT, DOT-HS-807-737, National Highway Traffic Safety Administration, Department of Transportation, Washington, DC.

Silyanov, V.V. (1973). "Comparison of the Pattern of Accident Rates on Roads of Different Countries." *Traffic Engineering and Control*, pp. 432-435.

Sivak, M. (1987). "Human Factors and Road Safety." *Applied Ergonomics*, 18(4).

Taaka, G.T. (1989). "An Analytical Model for Driver Response." *Transportation Research Record*, 1213.

Taaka, G.T. (1991). "Distribution of Driver Spare Glance Durations." *Transportation Research Record*, 1318.

Thompson, H.T. and Perkins, D.D. (1983). "Surrogate Measures for Accident Experience At Rural Isolated Horizontal Curves." *Transportation Research Record*, 905.

Tiehallinnon ohje TIEH 2100038-05. Tieliikenteen ajokustannusten laskenta. Tiehallinto, Helsinki, 2005

Transportation Research Board. (1985). Highway Capacity Manual. Transportation Research Board Special Report 209, Third Edition, Washington, DC.

Transportation Research Board. (1994). Highway Capacity Manual. Transportation Research Board Special Report 209, Third Edition, Washington, DC.

Zador, P.L., Stein, H., Wright, P. and Hall, J. (1986). Effects of Chevrons, Post-Mounted Delineators, and Raised Pavement Markers on Driver Behavior at Roadway Curves. Insurance Institute for Highway Safety, Washington, DC.

Zegeer, C.V., Deen, R.C., and Mayes, J.G. (1981). "Effect of Lane and Shoulder Widths on Accident Reduction on Rural, Two-Lane Roads." Transportation Research Record, 806.

21

## 9 LIITTEET

Liite 1 Nopeusennustemalleja

Liite 2 Nopeus-, hidastuvuus- ja kiihdytysmalleja kaarreaajoon



### Nopeusennustemalleja

(Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads; Misaghi ja Hassan, 2005)

Tekijä; malli; selityssaste	Ajoneuvotyyppi
Taragin (1954); $V_{85}=88.87-2,554.76/R$ ; 0.860	PC
McLean (1978) $V_{85}=101.2-0.0675CCR=101.2-2,730/R$ ; 0.870	PC
McLean (1979) $V_{85}=53.80+0.464V_{\mu}-3,260/R+85000/R^2$ ; 0.920	PC
Kerman ym. (1982) $V_{85}=V_a-V_a^3/398R$ ; 0.910	PC
Guidelines for the design of roads (1984) $V_{85}=60+39.70e^{-0.00358CCR}$ [LW=3.5 m]; 0.790	PC
Glennon ym. (1986) $V_{85}=103.96-(4524.94/R)$ ; 0.840	PC
Lamm and Choueiri (1987) $V_{85}=95.77-0.076CCR$ [LW=3.6m]; 0.836 $V_{85}=96.15-(2803.70/R)$ [LW=3.6m]; 0.824 $V_{85}=94.39-(3188.57/R)=93.85-0.045CCR$ ; 0.787 $V_{85}=55.84-(2809.32/R)+0.634LW+0.053SW+0.0004AADT$ ; 0.842	PC
Kanellaidis ym. (1990) $V_{85}=109.09-(3837.55/R)$ ; 0.647 $V_{85}=32.20+0.839V_a+(2,226.9/R)-(5,33.6/\sqrt{R})$ ; 0.925 $V_{85}=129.88-(623.1/\sqrt{R})$ ; 0.777	PC
Lamm (1993) $V_{85}=(10^6/8270+7.20CCR)$ ; 0.730	PC
Ottesen and Krammes (1994) $V_{85}=103.04-0.0477CCR=103.70-(3403/R)$ ; 0.800	PC
Morrall and Talarico (1994)	PC

$V_{85}=e^{(4.561-0.00586DC)}, 0.631$ Islam and Seneviratne (1994)	PC
$V_{85}=95.41-1.48DC-0.012(DC)^2$ [point of curve]; 0.990 $V_{85}=103.30-2.41DC-0.029(DC)^2$ [middle of curve]; 0.980 $V_{85}=96.11-1.07DC$ [point of tangency]; 0.980	
Krammes ym. (1995)	PC
$V_{85}=103.66-1.95DC$ ; 0.800 $V_{85}=102.45-1.57DC+0.0037L_C-0.10DF$ ; 0.820 $V_{85}=41.62-1.29DC+0.0049L-0.12DF+0.95V_T$ ; 0.900	
Lamm ym. (1995c)	PC
$V_{85}=(10^6/10150.1+7.676CCR)$ ; 0.810	
Choueiri ym. (1995)	PC
$V_{85}=91.03-0.050CCR$ ; 0.810 $\Delta V_{85PC}=3.64+1.78DC$ ; 0.510 $\Delta V_{85LT}=2.00DC$ ; 0.690 $\Delta V_{85T}=4.32+1.44DC$ ; 0.420	
Al-Masaeid ym. (1995)	PC, LT, HT
$\Delta V_{85ALL}=3.30+1.58DC$ ; 0.620 $\Delta V_{85ALL}=1.84+1.39DC+4.39P_{con}+0.07G^2$ ; 0.770 $\Delta V_{85ALL}=(5,081/R_2)-(5,081/R_1)$ [continuous curves]; 0.810 $\Delta V_{85ALL}=108.30-(3,498/L_T)-0.71[(DF_1*DF_2)/(DF_1+DF_2)]$ [common tangents]; 0.720	
Voigt (1996)	PC
$V_{85}=99.61-(2951.37/R)$ ; 0.840	
Abdelwahab ym. (1998)	PC
$\Delta V_{85}=0.9433DC+0.0847DF$ ; 0.920	
Pasetti and Fambro (1999)	PC
$V_{85}=103.90-(3020.50/R)$ ; 0.680	
Fitzpatrick ym. (2000)	PC
$V_{85}=106.30-(3595.29/R)$ [HC:0≤G<4, or HC+sag VC]; 0.920 $V_{85}=96.46-(2744.49/R)$ [HC:4≤G<9]; 0.560 $V_{85}=100.87-(2720.78/R)$ [HC:-9≤G<0]; 0.590 $V_{85}=101.90-(3283.01/R)$ [HC+LSD crest VC]; 0.780 $V_{85}=111.07-(175.98/K)$ [LSD crest VC]; 0.540 $V_{85}=100.19-(126.07/K)$ [HT+sag VC]; 0.680	
Ottesen and Krammes (2000)	PC
$V_{85}=102.44-1.57DC-0.012L_C-0.01DC*L_C$ ; 0.810	
Andueza (2000)	PC

$V_{85}=98.25-(2795/R)-(894/\text{Rad}+7.486\text{DC}+9.308L_T$  [horizontal curve]; 0.840  
 $V_{85}=100.69-(3,032/R)+27.819L_T$  [tangent]; 0.850  
 McFadden and Elefteriadou (2000) PC

$85\text{MSR}=-14.90+0.144V_{85T}-(954.55/R)+0.0153L_T$ ; 0.712  
 $85\text{MSR}=-0.812+(998.19/R)+0.017L_T$ ; 0.603

Gibreel ym. (2001) PC

$V_{85S1}=91.81+0.010R+0.468\sqrt{L_V}-0.006G_1^3-0.878\ln(A)-0.826\ln(L_0)$  [AT, sag]; 0.980  
 $V_{85S2}=47.96+7.216\ln(R)+1.534\ln(L_V)-0.258G_1-0.653A+0.02e^E-0.008L_0$  [BC, sag];  
 0.980  
 $V_{85S3}=76.42+0.023R+0.00023K^2-0.008e^A+0.062e^E-0.00012L_0^2$  [MC, sag]; 0.940  
 $V_{85S4}=82.78+0.011R+2.068\ln(K)-0.361G_2+0.036e^E-0.00011L_0^2$  [EC, sag]; 0.950  
 $V_{85S5}=109.45-1.257G_2-1.586\ln(L_0)$  [DT, sag]; 0.790  
 $V_{85C1}=82.29+0.003R-0.05\Delta_C+3.441\ln(L_V)-0.533G_1+0.017e^E-0.000097L_0^2$  [AT,  
 crest]; 0.940  
 $V_{85C2}=33.69+0.002R+10.418\ln(L_V)-0.544G_1+[8.699/\ln(1+A)]+0.032e^E-0.011L_0$  [BC,  
 crest]; 0.970  
 $V_{85C3}=26.44+0.251\sqrt{R}+10.381\ln(L_V)-0.423G_1+[6.462/\ln(1+A)]+0.051e^E-0.028L_0$  [MC,  
 crest]; 0.980  
 $V_{85C4}=74.97+0.292\sqrt{R}+3.105\ln(K)-0.85G_2+0.026e^E-0.00017L_0^2$  [EC, crest]; 0.900  
 $V_{85C5}=105.32-0.418G_2-0.123\sqrt{L_0}$  [DT, crest]; 0.830

Jensen ym. (2001) PC

$V_{85}=86.80+0.297V_P-0.614G_1-0.00239\text{ADT}$  [LSD]; 0.540  
 $V_{85}=72.10+0.432V_P-0.00212\text{ADT}$  [NLSD]; 0.420

Donnell ym. (2001) Trucks

$V_{85(1)}=56.1+0.117R-1.15G_1+0.006L_{T1}-0.000097(L_{T1})(R)$ ; 0.613  
 $V_{85(2)}=78.4+0.0140R-1.40G_2-0.00724L_{T2}$ ; 0.562  
 $V_{85(3)}=75.1+0.0176R-1.48G_2-0.00836L_{T2}$ ; 0.600  
 $V_{85(4)}=74.5+0.0176R-1.69G_2-0.00810L_{T2}$ ; 0.611  
 $V_{85(5)}=83.1-2.08G_2-0.00934L_{T2}$ ; 0.577



**Merkintöjen selitykset:**

A	= algebraic difference of vertical grades (%)
AADT; ADT	= average annual daily traffic and average daily traffic, respectively (vehicles/day)
ANOVA	= analysis of variance
AT; DT	= approach and departure tangent, respectively
BC; EC; MC	= beginning, end, and middle of curve, respectively
CCR	= curvature change rate (degree/km)
curve-dir	= curve direction (right-turn: curve-dir=1; left-turn: curve-dir=0)
DC	= degree of curvature (degrees)
DF	= deflection angle (degrees)
DF <sub>1</sub> ; DF <sub>2</sub>	= deflection angle for curves 1 and 2 of compound curve, respectively (degree)
DFC	= deflection angle of circular curve (degrees)
drv-flag	= driveway flag (intersection on curve: drv-flag=1; otherwise: drv-flag=0)
e; E	= superelevation rate (%)
G	= vertical grade (%);
G <sub>1</sub> ; G <sub>2</sub>	= first and second grade in direction of travel, respectively (%)
HT; LT	= heavy truck and light truck, respectively
int-flag	= intersection flag (intersection on curve: int-flag=1; otherwise: int-flag=0)
K	= length of vertical curve for 1% change in grade (m)
L <sub>C</sub>	= length of horizontal circular curve (m)
L <sub>T</sub>	= length of tangent (m)
LT <sub>1</sub> ; LT <sub>2</sub>	= length of preceding and succeeding tangent, respectively (m)
L <sub>V</sub>	= length of vertical curve (m)
L <sub>0</sub>	= distance between horizontal and vertical points of intersection (m)
LW; SW	= lane and shoulder width, respectively (m)
85 MSR	= maximum speed reduction from tangent to middle of curve (km/h)
PC	= passenger car
Pcon	= pavement condition (PSR≥3: Pcon=0; otherwise: Pcon=0)
preradius;	
suc-radius	= preceding and succeeding curve radius, respectively
R	= radius of the curve (m)
R <sub>a</sub>	= radius of previous curve (m)
sp-flag	= spiral flag (curve with spiral: sp-flag=1; otherwise: sp-flag=0)
SPSS	= statistical package for social sciences
V <sub>a</sub>	= curve approach speed (km/h)
V <sub>d</sub>	= desired speed (km/h)
V <sub>F</sub>	= approach tangent speed (km/h)
V <sub>P</sub>	= posted speed limit (km/h)
V <sub>T</sub>	= approach tangent speed (km/h)
V <sub>85</sub>	= 85th percentile speed (km/h)
V <sub>85MC</sub>	= 85th percentile speed at middle of curve (km/h)
Δ <sub>85</sub> V	= 85th percentile speed differential calculated as 85th percentile value of speed differentials of individual drivers
ΔV <sub>85</sub>	= 85th percentile speed differential calculated as difference between V <sub>85</sub> on two elements

**Nopeus-, hidastuvuus- ja kiihdytysmalleja kaarreajoon**  
(Fitzpatrick ym. 2000)

Taulukon 1 jarrutus- ja kiihtyvyyksille vastaavat nopeusennustemallit on esitetty taulukossa 2. Nämä nopeusennustemallit ovat tarkennetut versiot aiemmin kehitetyistä malleista. Taulukossa 3 on esitetty vastaavat jarrutus- ja kiihdytysmatkojen mallit.

Taulukko 1. Jarrutus- ja kiihdytysmallit.

Deceleration Rate, d(m/s <sup>2</sup> )		Alignment Condition <sup>b</sup>		Acceleration Rate, a (m/s <sup>2</sup> )	
Speed Profile					
Radius, R(m)	d	1-4	Horizontal Curves on Grade: -9% ≤ G<9%	Radius, R(m)	a
R≥436	0.00			R>875	0.00
175<R<436 $ -0.6794-\frac{295.14}{R} $				436<R<875	0.21
				250<R≤436	0.43
R<175	1.00			175<R≤250	0.54
1.00		5	Horizontal Curve Combined With Sag Vertical Curve	0.54	
(use rates for Alignment Conditions 1 through 4)		6	Horizontal Curve Combined With Non-Limited Sight-Distance Vertical Curve	(use rates for Alignment Conditions 1 through 4)	
1.00		7	Horizontal Curve Combined With Limited Sight-Distance Crest Vertical Curve (i.e., K≤43m/%)	0.54	
n/a		8	Sag Vertical Curve on Horizontal Tangent	n/a	
n/a		9	Vertical Crest Curve With Non-Limited Sight Distance (i.e., K>43 m/%) on Horizontal Tangent	n/a	
1.00		10	Vertical Crest Curve With Limited Sight Distance (i.e., K≤43 m/%) on Horizontal Tangent	0.54	

<sup>a</sup> Adapted from Fitzpatrick et al. 2000

<sup>b</sup> K = rate of vertical curvature, G = grade (%)

Taulukko 2. Nopeusennustemallit (Fitzpatrick ym. 2000)

AC EQ No. <sup>(a)</sup>	Alignment Condition	Equation <sup>(a)</sup>	No. of Obser.	R <sup>2</sup>	MSE
1.	Horizontal Curve on Grade: $-9\% \leq G < -4\%$	$V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$	21	0.58	51.95
2.	Horizontal Curve on Grade: $-4\% \leq G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	25	0.76	28.46
3.	Horizontal Curve on Grade: $0\% \leq G < 4\%$	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	25	0.76	24.34
4.	Horizontal Curve on Grade: $4\% \leq G < 9\%$	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$	23	0.53	52.54
5.	Horizontal Curve Combined With Sag Vertical Curve	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	25	0.92	10.47
6.	Horizontal Curve Combined With Non-Limited Sight-Distance Crest Vertical Curve	(see note 3)	13	n/a	n/a
7.	Horizontal Curve Combined With Limited Sight-Distance Crest Vertical Curve (i.e., $K \leq 43 \text{ m/\%}$ )	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$ (see note 4)	22	0.74	20.06
8.	Sag Vertical Curve on Horizontal Tangent	$V_{85} = \text{assumed desired speed}$	7	n/a	n/a
9.	Vertical Crest Curve With Non-Limited Sight Distance (i.e., $K > 43 \text{ m/\%}$ ) on Horizontal Tangent	$V_{85} = \text{assumed desired speed}$	6	n/a	n/a
10.	Vertical Crest Curve With Limited Sight Distance (i.e., $K \leq 43 \text{ m/\%}$ ) on Horizontal Tangent	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	9	0.60	31.10

NOTES:

- AC EQ No. = Alignment Condition Equation Number
- Where:  $V_{85}$  = 85th percentile speed of passenger cars (km/h)       $K$  = rate of vertical curvature  
 $R$  = radius of curvature (m)       $G$  = grade (%)
- Use lowest speed of the speeds predicted from AC EQ No. 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ No. 3 or 4 (for the upgrade).
- In addition, check the speeds predicted from AC EQ No. 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ No. 3 or 4 (for the upgrade) and use the lowest speed. This will ensure that the speed predicted along the combined curve will not be better than if just the horizontal curve was present (i.e., that the inclusion of a limited sight-distance crest vertical curve results in a higher speed).



Taulukko 3. Jarrutus- ja kiihdytysmatkojen määrittämiseen tarkoitetut yhtälöt (Fitzpatrick ym. 2000).

$$LSC_c = X_{fa} + X_{fd} \quad (1)$$

$$X_{fd} = LSC_a - X_{fd} - X_{fa} \quad (6)$$

$$X_{fd} = \frac{V_{fs}^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d} \quad (2)$$

$$X_{fd} = \frac{V_a^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d} \quad (7)$$

$$X_{cd} = \frac{V_n^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d} \quad (3)$$

$$V_a = V_n + V_a \quad (8)$$

Note: When calculating  $V_a$ , the curve with the larger radius is to be used.

$$X_{ca} = \frac{V_{n+1}^2 - V_n^2}{25.92 a} \quad (4)$$


$$\Delta V_a = \left( \frac{25.92ad(LSC_a) + dV_n^2 + aV_{n+1}^2}{(a+d)} \right)^{\frac{1}{2}} - V_n \quad (9)$$

$$X_{fa} = \frac{V_{fs}^2 - V_n^2}{25.92 a} \quad (5)$$

$$V_{n+1}^a = \left( V_n^2 + 2a(LSC_a) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Where:

$V_{fs}$	=	85 <sup>th</sup> percentile desired speed on long tangents (m)
$V_n$	=	85 <sup>th</sup> percentile speed on Curve n (km/h)
$V_{n+1}$	=	85 <sup>th</sup> percentile speed on Curve n+1 (km/h)
$V_{n+1}^a$	=	85 <sup>th</sup> percentile speed on Curve n+1 determined as a function of the assumed acceleration rate (km/h)
$V_a$	=	maximum achieved speed on roadway between curves in Condition B (km/h)
$\Delta V_a$	=	difference between speed on Curve n and the maximum achieved speed on roadway between curves in Condition B (km/h)
$d$	=	deceleration rate, see table 53 (m/s <sup>2</sup> )
$a$	=	acceleration rate, see table 53 (m/s <sup>2</sup> )
$LSC_c$	=	critical length of roadway to accommodate full acceleration and deceleration (m)
$LSC_a$	=	length of roadway available for speed changes (m)
$X_{fd}$	=	length of roadway for deceleration from desired speed to Curve n+1 speed (m)
$X_{cd}$	=	length of roadway for deceleration from Curve n speed to Curve n+1 speed (m)
$X_{ad}$	=	length of roadway for deceleration from $V_a$ to Curve n+1 speed (m)
$X_{ca}$	=	length of roadway for acceleration from Curve n speed to Curve n+1 speed (m)
$X_{fa}$	=	length of roadway for acceleration from Curve n speed to desired speed (m)
$X_{fb}$	=	length of roadway between two speed-limited curves at desired speed (m)



ISSN 1459-1553  
ISBN 978-952-221-209-2  
TIEH 3201132-v